

**Universita Karlova v Praze**

**Přírodovědecká fakulta**

Katedra fyzické geografie a geoekologie

Fyzická geografie a geoinformatika



Jiří Mašek

**Vytvoření a interpretace lokální letokruhové chronologie borovice lesní**

Development and interpretation of site tree-ring chronology of *Pinus sylvestris*

bakalářská práce

vedoucí práce: Mgr. Václav Tremel, Ph.D.

Praha 2017

## **Zadání bakalářské práce**

**Téma práce:** Vytvoření a interpretace lokální letokruhové chronologie borovice lesní

### **Cíle práce:**

1. Rešerše na téma vliv klimatu na růst dřevin a charakterizující klimatický signál borovice lesní.
2. Vytvoření lokální letokruhové chronologie borovice lesní, zjištění limitujících faktorů růstu a provedení dendroklimatické rekonstrukce.

**Zájmové území:** Bor nacházející se na západně orientovaném svahu údolí Střely u Rabštejna nad Střelou.

**Metody:** Zpracování rešerše na téma klimatický signál, rozšíření a ekologie borovice lesní ve střední Evropě. Zmapování klimatického signálu dřevin na území České republiky.

Pořízení vzorků v dané lokalitě, jejich následné zpracování a naměření. Vytvoření letokruhových chronologií různými způsoby a provedení korelační analýzy s klimatickými proměnnými. Provedení dendroklimatické rekonstrukce .

**Datové zdroje:** Odborná literatura, vzorky pořízené v zájmovém území a klimatická data z Climatic Research Unit.

Datum zadání: 24.1.2017

Jméno studenta: Jiří Mašek

Podpis studenta:.....

Jméno vedoucího práce: Mgr. Václav Tremel, Ph.D.

Podpis vedoucího práce:.....

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně,  
pouze s použitím citované literatury.

V Praze

.....

Jiří Mašek

## **Poděkování**

Zde bych chtěl velice poděkovat Mgr. Václavu Tremlovi PhD. za veškeré poskytnuté materiály, rady, rychlé reakce na dotazy a ochotu vždy pomoci. Velké díky patří mé rodině, která po mě v době psaní práce vyžadovala absolutní minimum domácích povinností. Děkuji všem svým kamarádům, kteří mě bavili a podporovali v dobách, nepříjemností kdy selhávala technika a podobně.

## **Abstrakt**

Předložená bakalářská práce se věnuje studiu klimatických faktorů, které ovlivňují růst borovice lesní (*Pinus sylvestris*) v lokalitě u Rabštejna nad Střelou. Primárním cílem bylo určení omezujících faktorů růstu stromů a provedení dendroklimatické rekonstrukce. K tomuto účelu byly odebrány vzorky na dané lokalitě a vytvořeny stanovištní chronologie různými způsoby standardizace. Pomocí korelačních koeficientů byly určeny limitující faktory růstu a na základě nejvyšší korelace byla provedena rekonstrukce metodou regrese i škálování.

Výsledky ukázaly silný vztah šířek letokruhů ke srážkám a vlhkostním poměrům především v letních měsících a v různých sezónách od dubna do srpna. Většina chronologií vykazala také pozitivní vliv únorových teplot. Pozorované letokruhově signatury v řadě případů dobře odpovídají různým klimatickým anomáliím.

Pro nejsilněji korelovanou proměnnou byla spočtena dendroklimatická rekonstrukce pro období 1850 – 2016, kdy byla chronologie spolehlivá. Rekonstruované průměrné srážky dobře odpovídají klimatické řadě z Klementina i jiným srážkovým rekonstrukcím.

Klíčová slova: borovice lesní, letokruhově chronologie, klimatické faktory růstu, dendroklimatologie

## **Abstract**

The presented bachelor thesis deals with the study of climatic factors that influence the growth of the pine (*Pinus sylvestris*) in the locality near Rabštejn nad Střelou. The primary objective was to determine the limiting factors of tree growth and to perform dendroclimatic reconstruction. For this purpose, samples were taken at the site and local chronologies were created using various standardization methods. Using the correlation coefficients, limiting growth factors were determined, and reconstruction by regression and scaling was performed based on the highest correlation.

The results showed a strong relationship of rings width to rainfall and humidity conditions, especially in the summer months and in various seasons from April to August. Most of the chronologies also showed the positive influence of February temperatures. Observed signature rings in many cases are well responsive to various climatic anomalies.

For the most correlated variable, dendroclimatic reconstruction was calculated for the period 1850 - 2016 when the chronology was reliable. The reconstructed average rainfall corresponds well with the Klementinum climate line and other rainfall reconstructions.

Key words: Scots pine, tree ring chronology, climatic factors of growth, dendroklimatology

## Obsah

Abstrakt .....	5
Abstract .....	5
1. Úvod .....	9
2. Cíle bakalářské práce.....	9
3. Borovice lesní.....	10
3.1 Ekologické vlastnosti .....	10
3.2 Biologie borovice lesní.....	10
3.3 Stavba dřeva .....	11
3.4 Současný areál borovice lesní .....	12
3.5 Borové lesy v České republice .....	13
3.6 Vývoj areálu borovice lesní v holocénu .....	16
4. Klimatický signál borovice lesní ve střední Evropě.....	18
4.1 Regionální přehled .....	18
4.2 Typ klimatického signálu .....	20
4.3 Délka chronologií borovice a jejich síla.....	21
4.4 Způsoby standardizace a typy chronologií .....	22
4.5 Letokruhové signatury borovice lesní .....	23
5. Letokruhové chronologie z území České republiky a jejich klimatický signál.....	23
5.1 Pohraniční pohoří .....	23
5.2 Nížinné oblasti.....	24
5.3 Českomoravská vrchovina .....	25
6. Fyzickogeografická charakteristika studovaného území .....	26
7. Materiál a metodika.....	28
7.1 Odběr vzorků.....	28
7.2 Zpracování.....	28
7.3 Klimatická data.....	30
7.4 Korelační analýza .....	30
7.5 Vyjádřený populační signál.....	30
7.6 Dendroklimatická rekonstrukce.....	30
8. Výsledky.....	31
8.1 Charakteristiky chronologií.....	31
8.2 Klimatické proměnné ovlivňující růst .....	35
8.3 Dendroklimatická rekonstrukce.....	37
9. Diskuse .....	39
9.1 Odezva na klima .....	39

9.2	Významné roky .....	39
9.3	Porovnání dendroklimatických rekonstrukcí.....	40
9.4	Má chronologie potenciál? .....	41
10.	Závěr.....	41
11.	Literatura .....	43



## 1. Úvod

Zjišťování faktorů, které ovlivňují růst stromů je velice důležité. Lesy jsou významné jednak z hospodářského hlediska jako zdroj dřeva a jednak mají velký význam v přírodě samotné, např. do biomasy vážou velké množství CO<sub>2</sub> (Durrant a kol. 2016).

Za zakladatele dendrochronologie je považován Andrew Ellicott Douglas, který zjistil, že šířky letokruhů stromů v suché jihozápadní části Spojených států mohou poskytnout dlouhý záznam variability srážek (Bradley 1999). Díky tomu, že šířky letokruhů a jejich struktura odráží podmínky, které ovlivňovaly strom v době vzniku, mohou letokruhy posloužit k poznání environmentálních změn v minulosti (Pallardy 2008).

Vzhledem k tomu, že dendrochronologie stojí na pomezí řady disciplín jako biologie, ekologie, fyzická geografie a další, začaly se z ní postupem času vyčleňovat různé dílčí obory využívající nejen šířky letokruhů, ale i jiná proxy měřitelná ve dřevě stromů (Schweingruber 1996). Významnými oblastmi výzkumu je dendrogeomorfologie studující svahové procesy, dendroklimatologie, která rekonstruuje klima v minulosti, nebo samotné datování staveb, či uměleckých děl ze dřeva (Kyncl 2017). Každá z těchto disciplín se snaží získat z letokruhů jinou informaci, kterou nazýváme signál. Veškeré ostatní informace jsou považovány za šum, který je potřeba odstranit, k čemuž slouží různé dendrochronologické metody (Cook & Kairiukstis 1990).

V České republice vzniká mnoho dendrochronologických prací zaměřených na zjišťování klimatických faktorů ovlivňujících stromy, či samotné klimatické rekonstrukce, ovšem prací, které se zabývají borovicí lesní, je poměrně málo. Ty přitom mohou potenciálně dobře indikovat vliv sucha, které je díky klimatickým změnám v dnešní době aktuálním problémem.

## 2. Cíle bakalářské práce

Cílem této práce bylo vytvořit rešerši popisující vlivu klimatu na růst dřevin a charakterizující klimatický signál borovice lesní (*Pinus sylvestris*) ve střední Evropě. Dalším důležitým cílem bylo vytvoření stanovištní letokruhově chronologie borovice lesní v lokalitě u Rabštejna nad Střelou a zjištění limitujících faktorů růstu v této lokalitě. Posledním cílem bylo provedení dendroklimatické rekonstrukce na základě vytvořené letokruhově chronologie.

### 3. Borovice lesní

#### 3.1 Ekologické vlastnosti

Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) má velice širokou ekologickou valenci, výrazně limitující je pro ni pouze dostupnost světla. Právě proto, že jde o výrazně světlomilnou dřevinu, se vyskytuje především v rozvolněných porostech a příliš dobře nesnáší hustě zapojený les (Úradníček a kol. 2009). Často osidluje druhotně narušené volné plochy odhalené požáry, erozí, nebo odtěžením. Je to pionýrská dřevina a často se vyskytuje v iniciálních stádiích sukcese (Businský a Velebil 2011). Díky svým hlubokým kořenům je schopna pokrýt potřebu vody i v době nedostatku srážek a vyskytuje se na stanovištích výrazně suchých, ale i podmáčených. Nenáročná je také na půdní podmínky, bez problémů roste na štěrku, suchých písčích, sutích, vátých písčích, nebo dunách, snáší i skalní štěrbiny, rašeliny a bažiny, to samé platí i o nenáročnosti z hlediska horninového podloží (Úradníček a kol. 2009). Často bývá na mělkých skalnatých půdách s nízkým obsahem fosforu a dusíku, kde je pomalý proces humifikace (Chytrý a kol. 2010). Všeobecně ovšem preferuje spíše půdy lehčí, kypré, hluboké a dobře drenážované. U nás nacházíme suché bory na silikátech, vápnitých horninách i hadcích (Chytrý a kol. 2010). Co se týče nároků borovice lesní na klima, tak i zde má široký rozsah, běžně se vyskytuje v nížinných oblastech i ve vysokých nadmořských výškách. Zvládá vysoké rozdíly teplot, které nastávají v jejím areálu. Dobře odolává také různým disturbancím, např. vývrátům či požárům (protože ji chrání její silná borka) (Svoboda 1953). Jedna z mála věcí, ke kterým je citlivá, je znečištění ovzduší. Borovicím sice emise všeobecně nedělají moc velký problém, ale právě *Pinus sylvestris* je vůči nim relativně málo odolná (Úradníček a kol. 2009). Stejně tak je náchylná vůči slaným přímořským větrům (Durrant a kol. 2016).

#### 3.2 Biologie borovice lesní

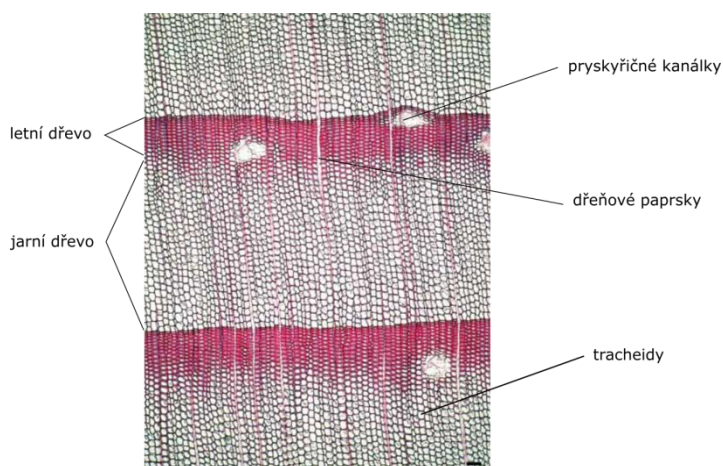
Borovice lesní je strom středního vzrůstu, málokdy dorůstající výšky až 45 m. Kmen bývá přímý a válcovitý s maximálním průměrem okolo 100 cm. V mládí mívá tenkou oranžovou a lehce odlupčivou borku, později bývá tlustá okolo 3 cm a velmi odolná. Dožívá se běžně 300 let, v některých případech až 500. Dřevo je křehké, rozdělené na jádro a běl. Často se stává, že sníh a námraza způsobí ulomení vzrostného vrcholu. Jehlice, které jsou šedozelené a dlouhé 3–8 cm, shazuje po dvou až třech letech. *Pinus sylvestris* má svazečku vždy dvě jehlice (Úradníček a kol. 2009). Ve svém životním cyklu vyžaduje periodu zimního klidu a aktivní začíná být na jaře, kdy začnou být průměrné denní teploty okolo 5 °C (Durrant a kol. 2016).

Vzhledem k různým fyzickogeografickým podmínkám, které panují v rámci jejího rozsáhlého areálu, se vytvořila celá řada geograficky odlišných typů borovice lesní, které je třeba rozlišovat (Fajron and Filer 2010). Businský a Velebil (2011), uvádějí tři základní formy: severskou, kavkazskou a východoasijskou. V rámci každé této formy je mnoho různých klimatypů např. borovice laponská, borovice uralská, borovice hercynská, borovice jakutská a další (Svoboda 1953). I u nás se rozlišují různé místní ekotypy (borovice heraltická, třeboňská borovice atd.) (Úradníček a kol. 2009).

### **3.3 Stavba dřeva**

Makroskopická stavba dřeva borovice lesní je typická rozdělením na jádro a běl, což je nejlépe patrné na radiálním řezu kmenem. Šířka běli je většinou nad 5 cm, zpravidla bývá zbarvena do žluta, ale po pokácení stromu tmavne až k namodralým odstínům. Jádrové dřevo je naopak vždy tmavé a na rozdíl od měkké běli je tvrdé a trvanlivé (hustota okolo  $505 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , tvrdost 28,5 Mpa) (Lexikon dřev). Dalším výrazným znakem, který na dřevě pozorujeme, jsou samozřejmě letokruhy. Ostrost přechodu z jarního na letní dřevo je u jednotlivých druhů dřevin rozdílná, borovice lesní patří mezi dřeviny, u kterých je tato hranice jasně patrná. Podíl jarního dřeva, které je světlejší a je tvořeno tenkostěnnými tracheidami s vodivou funkcí, je větší než podíl letního dřeva, které má spíše mechanickou podpůrnou funkci a je tedy složeno z tlustostěnných buněk (Stoch et al. 2004). Celkově je dřevo borovice lesní tvořeno přibližně z 95 % tracheidami (Obr. 1), buňkami protáhlými ve směru rovnoběžném s osou kmene a dále dřeňovými paprsky a pryskyřičnými kanálky. Dřeňové paprsky jsou orientovány kolmo na osu kmene a v případě *Pinus sylvestris* jsou heterocelulární, tedy složeny z parenchymu a ležatých tracheid (Lexikon dřev). Zmíněné pryskyřičné kanálky jsou důležité pro ochranu před poraněními a následnou infekcí (Pallardy 2008). Makroskopicky se projevují jako tmavé tečky v jarním dřevě, světlé v letním, nebo jako pásy. Pod mikroskopem je pak patrné, že jsou tvořeny 4–5 tenkostěnnými buňkami.

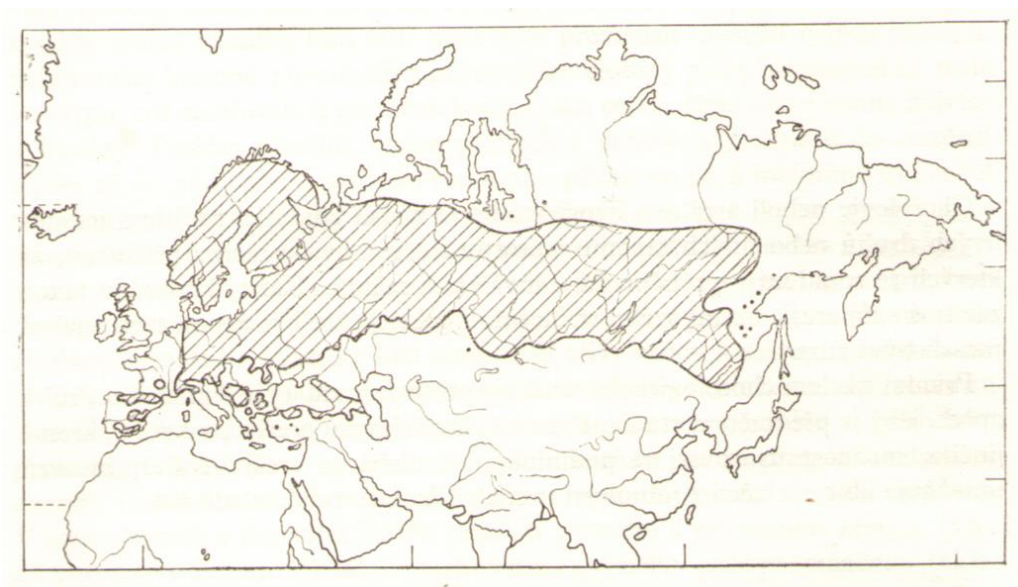
**Obrázek 1: Příčný řez dřevem borovice lesní (Čufar, Zupančič 2009, upraveno)**



### 3.4 Současný areál borovice lesní

Dnešní areál rozšíření *Pinus sylvestris* je typicky eurychorní (Obr. 2) (Hendrych 1984).

**Obrázek 2: Areál borovice lesní (podle Hendrych 1984)**



Nápadné je rozšíření borovice v rovnoběžkovém směru. Areál zabírá velkou část Eurázie od severu Portugalska a Skotska po Dálný Východ (po cca 142° v.z.d.). V poledníkovém směru zasahuje od jihu Španělska a středního Turecka až po severní Norsko (Businský a Velebil 2011). Z obrázku je patrné, že jako původní chybí borovice v nížinách západní Evropy s oceánským typem klimatu (Anglie, Irsko, Dánsko, severozápad Francie) (Svoboda 1953). V rámci svého areálu je ovšem borovice zastoupena nerovnoměrně. Všeobecně se dá říci, že v severních oblastech svého rozšíření se drží spíše v nížinných oblastech. Naopak na jihu se vyskytuje především ve vyšších nadmořských výškách (např. na Kavkaze dosahuje až

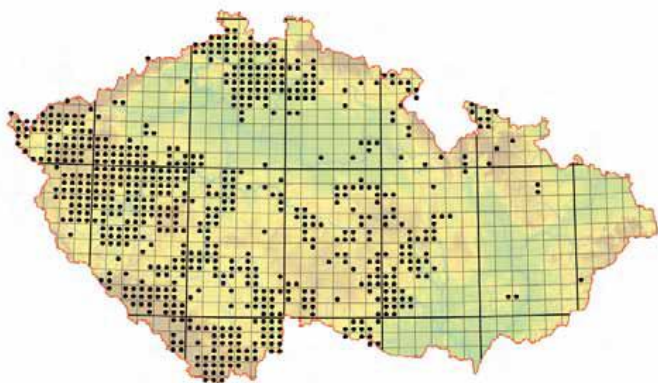
přibližně do 2600 m n. m.) (Durrant a kol. 2016). Nutno podotknout, že její výskyt v oblastech střední Sibiře je výrazně podmíněn vlivem požárů, které je schopna přežít pouze ona. Nebýt tohoto fenoménu, zřejmě by zde figuroval především smrk (Svoboda 1953). Vzhledem k celkovému oteplování klimatu se dá do budoucna očekávat, že se její areál posune více k severu a porosty v jižních oblastech, jako na Iberském poloostrově, Balkáně a v severní Anatolii, postupně vymizí (Durrant a kol. 2016).

### 3.5 Borové lesy v České republice

Lesní porosty s dominující borovicí se u nás vyskytují jen maloplošně, rozsáhlejší se nacházejí až v tajze. Často se borovice vyskytuje v lesích smíšených s břízou, buky, duby, smrky, modřínou a dalšími dřevinami (Durrant a kol. 2016). Borové porosty u nás dělíme do několika typů, základní jsou suché bory dělicí se na boreokontinentální bory, lesostepní bory, a perialpidské hadcové bory. Dále jsou zde ještě brusnicové a suchopýrové bory v rašelinných oblastech a subkontinentální borové doubravy (Chytrý a kol. 2010).

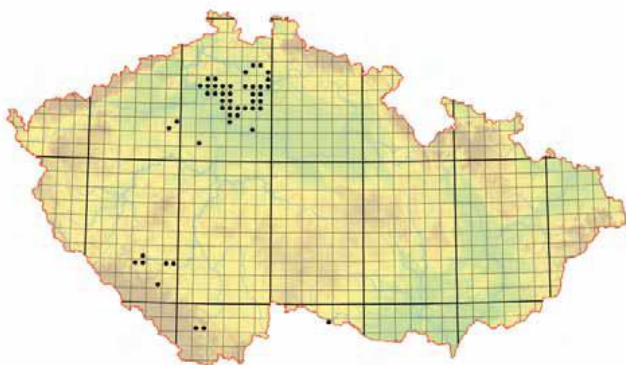
Boreokontinentální bory, jsou u nás nejrozšířenější (Obr. 3). Tyto porosty se vyskytují především na silikátových horninách Českého masívu a na pískovcích České tabule. Bývají maloplošně na skalních ostrožnách kde je málo vlhkosti a půdy mají malý obsah humusu. Podrost je tvořen především mechy, lišejníky a acidofilními travami (Chytrý a kol. 2010).

**Obrázek 3:** Rozšíření boreokontinentálních borů v ČR. Mapa zčásti zahrnuje kulturní bory na stanovišti jiných lesních biotopů (Chytrý a kol. 2010).



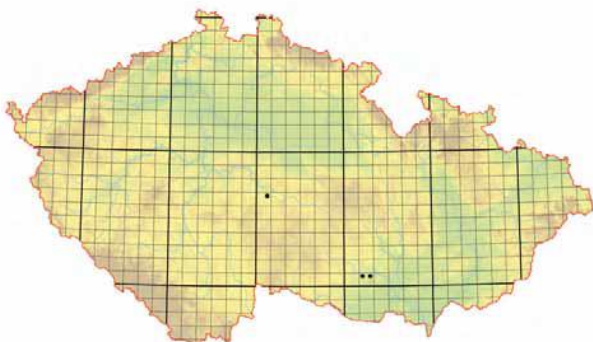
Lesostepní bory (Obr. 4), mívají na rozdíl od boreokontinentálních poměrně bohaté keřové i bylinné patro (významné bývají vstavačovitě druhy). Zajímavý je výskyt druhů perialpidských až submediteránních společně s druhy boreokontinentálními a hemiboreálními. Tyto bory jsou u nás většinou na jižně orientovaných svazích pahorkatin tvořených slínovci, vápenitými pískovci a na JZ Moravy dokonce přímo na krystalických vápencích (Chytrý a kol. 2010).

**Obrázek 4: Rozšíření lesostepních borů v ČR. (Chytrý a kol. 2010).**



Posledním zástupcem suchých borů jsou perialpidské hadcové bory (Obr. 5). Jejich rozšíření na našem území je ostrůvkovité, omezené na výskyt hadcového podloží a na severně orientovaných svazích říčních údolí (Chytrý a kol. 2010). Porosty bývají rozvolněné s dříšťálem v keřovém patře a dobře vyvinutým mechovým patrem.

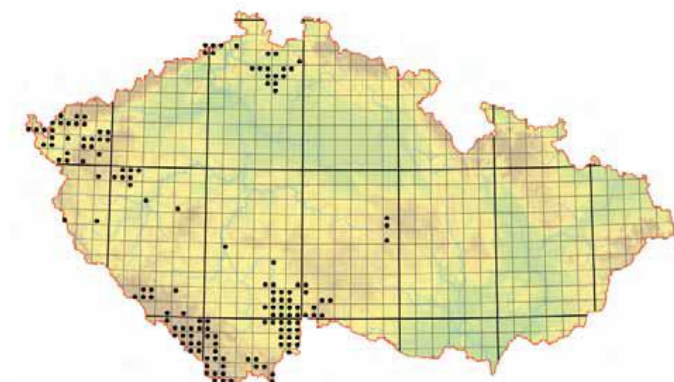
**Obrázek 5: Rozšíření perialpidských hadcových borů v ČR. (Chytrý a kol. 2010).**



Rašelinné brusnicové bory tvoří klimaxové stadium na vrchovištích na Šumavě, Labských pískovcích, Dokesku a dalších lokalitách (Obr. 6) (Chytrý a kol. 2010). V těchto lesích bývá hladina podzemní vody asi 30 cm pod povrchem. Z hlediska druhové skladby je zde kromě dominantní borovice lesní také smrk ztepilý, bříza bělokorá a občasně také borovice blatka. Na rašelinných půdách se vyvinulo bohaté mechové i keřové patro.

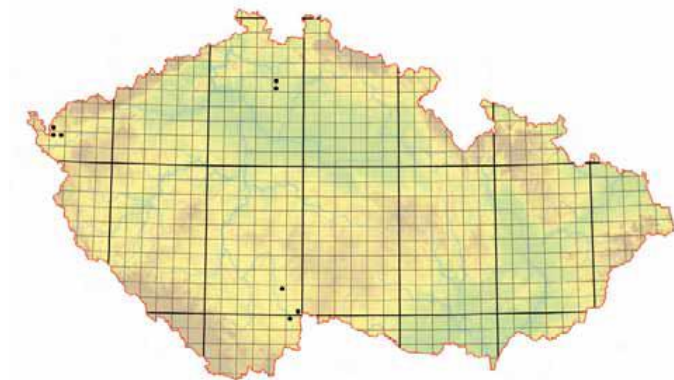


**Obrázek 6: Rozšíření rašelinných brusnicových borů v ČR. (Chytrý a kol. 2010).**



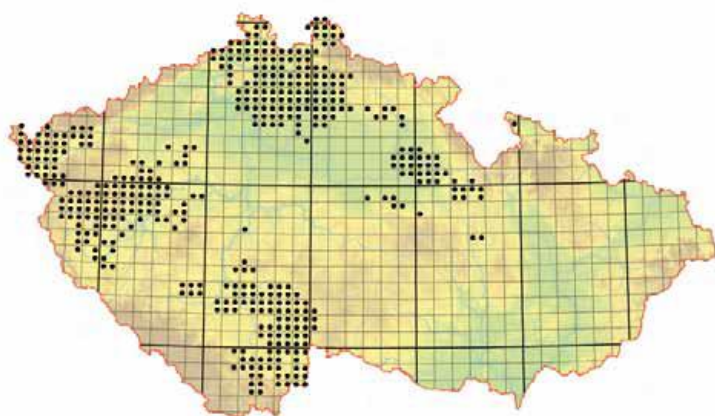
Dalším typem borů jsou suchopýrové bory kontinentálních rašelinišť (Obr. 7). Jedná se zpravidla o rozvolněné porosty, kde borovice tvoří stromové i keřové patro (Chytrý a kol. 2010). Hladina podzemní vody během roku značně kolísá a hloubka rašeliny je výrazně menší než na vrchovištích. Na obrázku č. 7 je znázorněno jejich rozšíření na našem území.

**Obrázek 7: Rozšíření suchopýrových borů kontinentálních rašelinišť (Chytrý a kol. 2010).**



Posledním typem borů u nás jsou subkontinentální borové doubravy, což jsou světlé a druhově poměrně chudé porosty (Obr. 8) (Chytrý a kol. 2010). Bylinné patro je tvořeno často keříčky, kapradinami a různými druhy trav. Vyskytují se především v oblastech kambizemí vzniklých na kyselých pískovcích, štěrcích a arkózách.

**Obrázek 8: Rozšíření subkontinentálních borových doubrav (Chytrý a kol. 2010).**



### **3.6 Vývoj areálu borovice lesní v holocénu**

Informace o rozšíření vegetace v geologické minulosti získáváme především díky fosiliím pylu, dřev, plodů a listů uchovaným např. v jezerních sedimentech či rašeliništích. Dobrou představu nám mohou poskytnout také palynologické diagramy, sestavované z pylových zrn nalezených v půdě a rašelině, či analýza uhlíků v různých přírodních archivech. Časté jsou i poznatky z archeologických vykopávek (Hendrych 1984).

Borovice vždy obsazovala extrémní typy prostředí, díky vysoké ekologické valenci se jí podařilo přetrvat v našich oblastech v podobě refugií i nejméně příznivých glaciálů (Pokorný 2011). V období interstadiálů byla borovice společně s břízou dominantou zdejších lesů díky tomu, že se šířila ze svých refugií, zatímco jiné druhy teprve přicházely z jižnějších oblastí (Pokorný 2011). Tyto kompetičně schopnější druhy jako kachna by ji vytlačily na okrajová stanoviště, ale v postupu jim vždy zabránilo opětovné ochlazení ve stadiálech, takže borovice byla velmi dlouho hlavní dřevinou zdejších lesů (Pokorný 2011). Posledním takovýmto chladným výkyvem byl mladší dryas, jeho koncem (asi 9500 let př. Kr.) končí pleistocén a začíná holocén. V preboreálu se silně oteplilo a zvlhčilo podnebí, což vedlo k šíření lesů, které byly tvořené zejména pionýrskými dřevinami jako bříza a borovice (Ložek 2007). Ještě asi 1500 let po začátku holocénu byla borovice velmi abundantním druhem (Pokorný 2011). Během preboreálu zde zřejmě ještě byly lesostepní bory, ale postupem času byla borovice úplně vytlačena na různá okrajová stanoviště. Všeobecně se ve středním holocénu borovice vyskytovaly na skalních výchozech, teplých suchých jižních svazích, písčivých přesypech, terasách, hadcových podkladech atd. (Pokorný 2011). V období atlantiku se borovice vyskytovaly na skalách, písčivcových a hadcových podkladech, okrajově v podobě lesostepí a boreokontinentálních borů s chudým podrostem kvůli nedostatku živin (Pokorný 2011). Tak

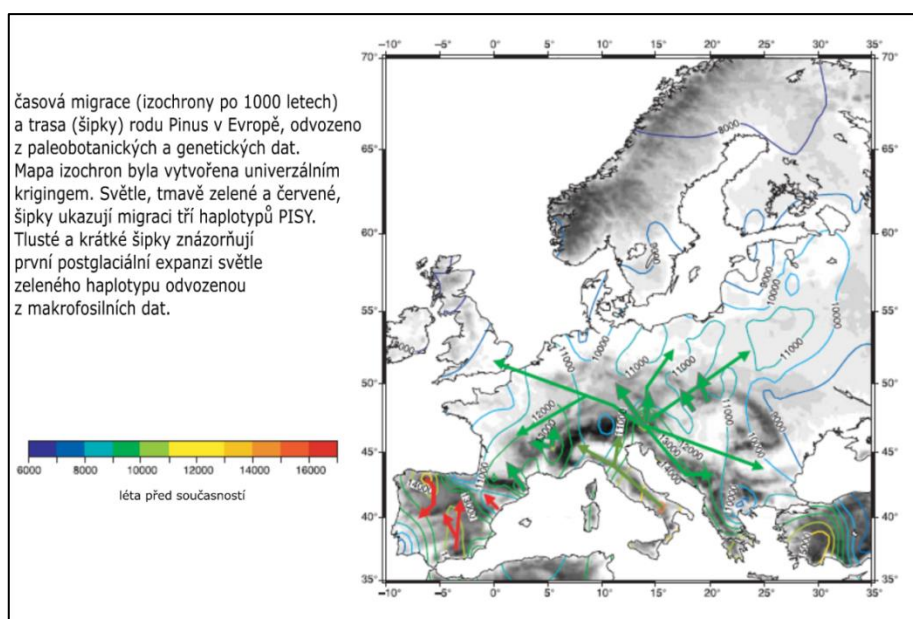


tomu pravděpodobně bylo i během subboreálu. Od subboreálu (od 500 př. n. l.) mělo na krajinu už zásadní vliv působení člověka, které se v recentu projevilo vysazováním borových a smrkových lesů (Ložek 2011). Téměř veškeré pylové diagramy ze střední Evropy nám zachycují dvouvrcholovou křivku borovice lesní. První nápadné maximum je vidět v pozdním glaciálu, posléze křivka klesá až přibližně do subboreálu (cca 3000 před n. l.) a po té narůstá až do současnosti (Pokorný 2011).

Je samozřejmé, že rozšíření borovice bylo v rámci celé Evropy v průběhu holocénu velice rozdílné a záviselo na mnoha faktorech jako morfologie krajiny, postupný vývoj klimatu, půdní podmínky atd.

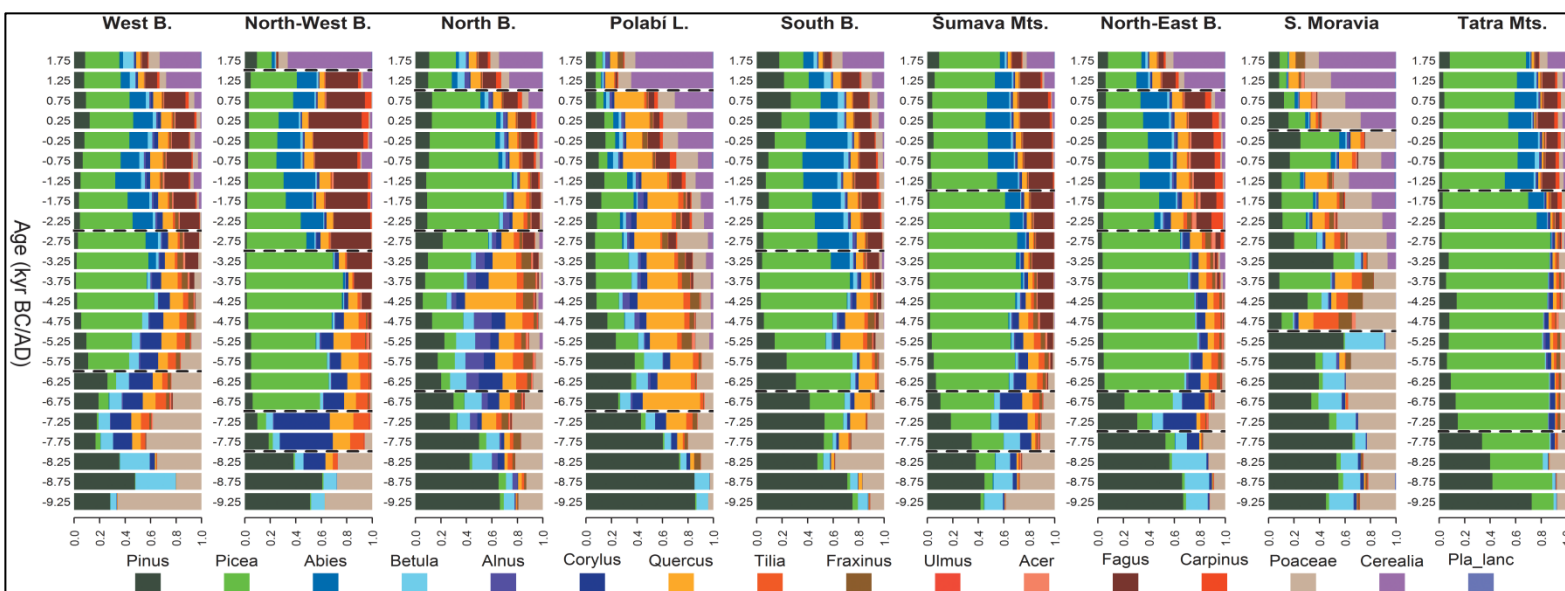
Například ve skandinávské oblasti měla borovice lesní v minulosti svou polární hranici dále na sever než dnes, stejně tak i její horní hranice byla ve vyšší nadmořské výšce. Naprosto největší rozmach měla borovice ve Skandinávii asi před 8000–7000 lety, poté pokles v atlantiku a následný nárůst od subboreálu, podobně jako ve střední Evropě (Richardson 1998). Na britských ostrovech byla borovice zejména ve Skotsku silně zastoupena ještě před asi 5700 lety. Ovšem před 4400 lety v subboreálu, v době kdy se u nás borovice opět šířila, byl zaznamenán v západní Evropě její silný ústup (Richardson 1998). V jižní Evropě se borovice lesní vyskytovala vždy méně, byly zde spíše druhy jako *Pinus nigra*, *P. halepensis*, *P. pinaster* a další (Richardson 1998). Přibližný postup šíření rodu borovice z jejích jižních refugií rekonstruoval Cheddadi (2006) (Obr. 9). Je evidentní, že severnější refugia ve střední Evropě nebyla zohledněna, ale pro základní představu nám může tato studie dobře posloužit.

**Obrázek 9: Šíření rodu borovice (Cheddadi 2006)**



Z hlediska kontinuity se v České republice uvažuje o několika oblastech s trvalou přítomností borů v celém holocénu. Jde zejména o staroholocenní relikty tajgových lesů na Třeboňsku (Pokorný 2011). Také na západě Čech v Plzeňské kotlině a na Klatovsku jsou zřejmě bory nezasázeny expanzí habru a jiných listnatých dřevin (Pokorný 2011). Novák et al. (2012) uvádí kontinuitu borového lesa od raného holocénu na Dokesku, pylové diagramy dokazují, že je zde již 9000 let. Jedná se zřejmě o porosty analogické k dnešním boreálním lesům v severní Eurásii. Abrahám et al. (2016) zkoumali vývoj vegetace v různých oblastech České republiky. Výsledky jejich práce ukázaly, že na většině lokalit byl rod *Pinus* zastoupen po celý Holocén (Obr. 10). Pravděpodobně je to způsobeno výraznou dynamikou prostředí, člověkem řízenými či přirozenými požárovými disturbancemi atd.

Obrázek 10: Zastoupení významných rostlinných rodů během Holocénu (převzato z Abrahám et al. 2016)



#### 4. Klimatický signál borovice lesní ve střední Evropě

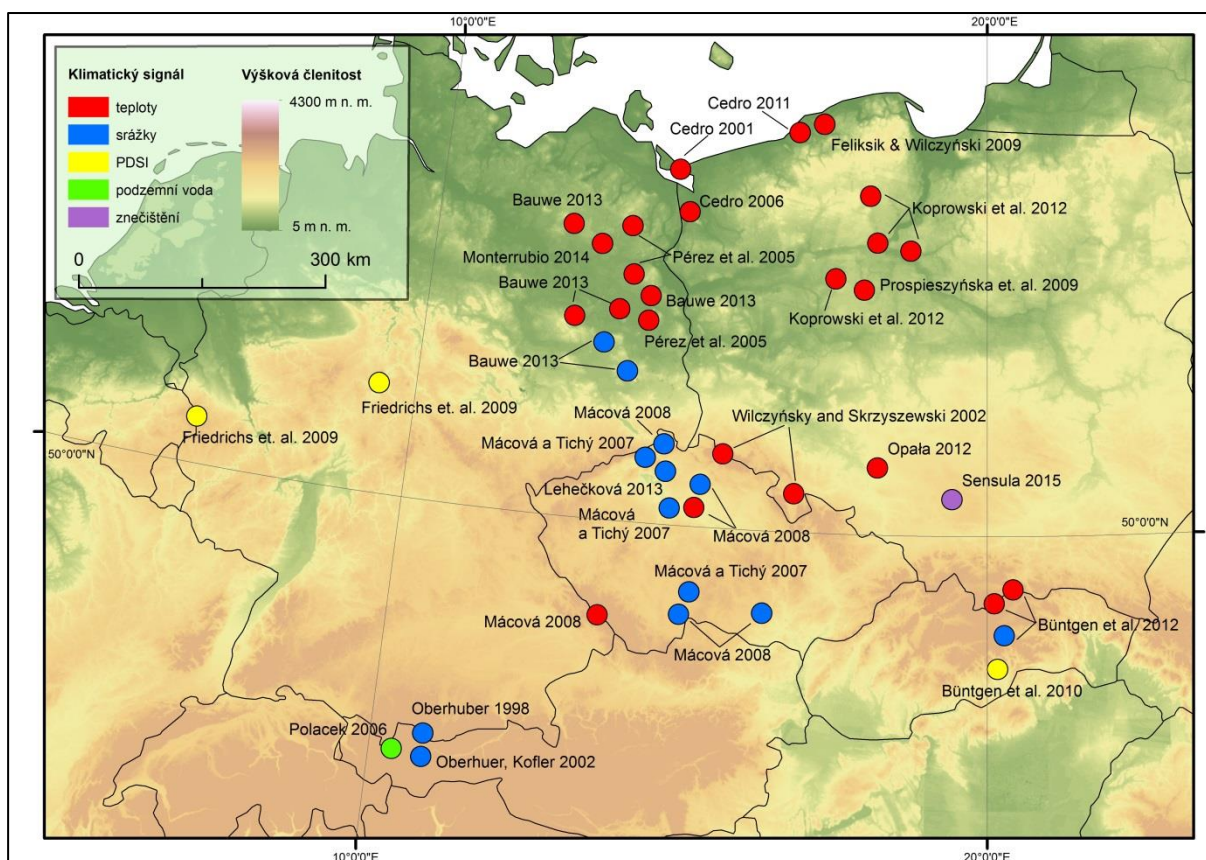
Vlivem klimatických faktorů na růst borovice lesní se zabývá mnoho studií především ze Skandinávského poloostrova, Španělska, Skotska či Sibiře. I v našich středoevropských podmínkách nalezneme podobné výzkumy.

##### 4.1 Regionální přehled

Dendroklimatologické studie jsou v rámci střední Evropy rozmístěny nerovnoměrně (Obr. 11). Nejvíce chronologií je vytvořeno v na území Polska a to zejména v jeho severní části v blízkosti pobřeží Baltského moře (Cedro 2001, 2006, 2011, Pospieszyńska et al. 2009, Koprowski et al. 2012). V těchto oblastech jsou totiž často rozsáhlé borovicové porosty v nížinách, u některých se dokonce předpokládá, že jde o staroholocenní relikty

(Pospieszyńska et al. 2009). Na jižních hranicích Polska vzniká také řada studií na borovici lesní, ty bývají zaměřeny na stromy rostoucí ve vyšších nadmořských výškách v okrajových pohořích. Mezi ně můžeme zařadit práci Opaly (2012), Sensuly (2015), nebo Wilczyńskiego a Skrzyszewského (2002). Řada prací je z oblasti Německa a to zejména z Braniborska (Bauwe 2013, Pérez et al. 2005). Ostatní německé studie (např. Friedrichs et al. 2009 a Monterrubio 2014) jsou rozmístěny různě po celém státě. Na území Rakouska je výzkumů méně a bývají z extrémních stanovišť. Můžeme uvést studii Oberhubera (1998), nebo společnou práci Oberhubera a Koflera z roku 2002, obě popisují reakce stromů na klima v suchých alpských údolích. Také je zde výzkum, který provedl Polacek (2006) na borovicích rostoucích na aluviálních terasách říčních toků. V oblasti Slovenska byly nalezeny dvě studie a obě vytvořil Büntgen (2010, 2012). První vznikla v roce 2010 v Rudohoří, druhá roku 2012 ve Vysokých Tatrách na Slovensko-Polských hranicích. Z dendroklimatologických studií na borovici lesní vytvořených v rámci České republiky můžeme jmenovat práci Mácové (2008), Lehečkové (2013) a Mácové a Tichého (2007). Jedná se především o studie stromů rostoucích na pískovcových skalách, jejichž zastoupením Česká republika ve střední Evropě vyniká.

**Obrázek 11: Rozmístění letokruhových chronologií borovice lesní ve střední Evropě**



## 4.2 Typ klimatického signálu

Klimatický signál borovice lesní je silně stanovištně závislý a je proto těžké konkrétně určit oblasti s jasným typem klimatického signálu, nicméně můžeme pozorovat alespoň některé trendy (Obr. 11).

Na severu střední Evropy v Severoněmecké a Velkopolské nížině je pro růst borovice lesní určující především klima v únoru a červnu. Mírné vlhké zimy růst podporují, zatímco teplá a suchá léta jej redukuje (Cedro 2006, Pérez et al. 2005, Bauwe 2013). Ve Středoněmecké vysočině můžeme pozorovat silné korelace s Palmerovým indexem sucha a to nejen u borovice lesní, ale také u buku lesního a dubu zimního (Friedrichs et al. 2009).

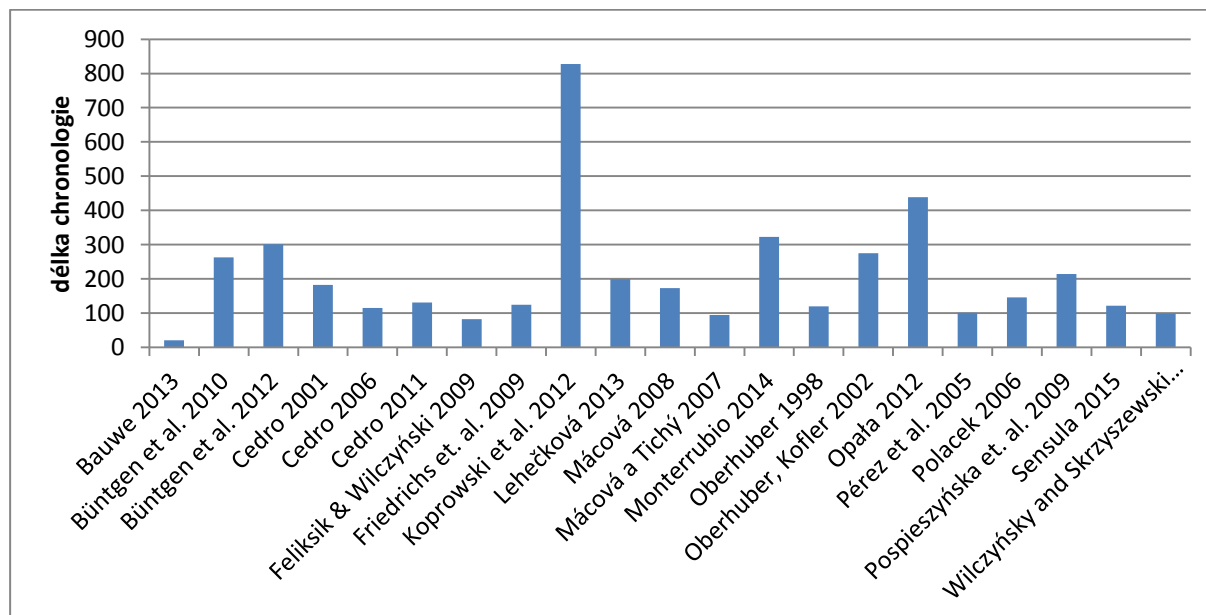
S narůstající výškovou členitostí se zvyšuje stanovištní závislost klimatického signálu, mnohem více zde hrají roli faktory jako sklon a orientace svahu, půdní typ aj. Na území České republiky se tento fakt silně projevuje, jak dokazuje např. práce Mácové (2008), která porovnávala vliv klimatu na stromy v různých lokalitách. Vzorky byly pořízeny ve třech různých oblastech České republiky (na pískovcových skalách, na suchých teplých neskalknatých stanovištích a na chladných vlhkých lokalitách). Z výsledků jasně vyplývá, že šířky letokruhů pozitivně reagují na únorové i březnové teploty a to na všech stanovištích, významný byl také vliv srážek. Ten byl silný na suchých a teplých stanovištích, ale na skalních lokalitách velice slabý (dokonce slabší než na chladných a vlhkých). Pravděpodobně to je způsobeno tím, že borovice lesní je schopna efektivně využívat vodu usazenou ve zvětralých skalních štěrbinách. V oblasti Karpat se signál borovic v různých lokalitách také značně liší. V polohách okolo 800 m n. m. stromy reagují především na PDSI a množství srážek (Büntgen et al. 2010, 2012). Naopak jedinci rostoucí ve vyšších nadmořských výškách nad 1000 m n. m. vykazují kladné korelace s teplotami a na množství srážek nijak nereagují (Büntgen et al. 2012).

Ve střední Evropě borovice všeobecně vykazují kladné korelace s únorovými, případně i lednovými teplotami. V případě chladných oblastí bývají obvykle limitující březnové teploty (Feliksik & Wilczyński 2009, Koprowski et al. 2012). Častý je také pozitivní vliv srážek a všeobecně přítomnosti vláhy v půdě a negativní působení teplot (Koprowski et al. 2012). Typické jsou také pozitivní reakce na teploty v oblastech vlhkých a chladných, případně v horských i podhorských (Feliksik & Wilczyński 2009). Výrazný vliv na šířky letokruhů má také hladina podzemní vody. Například borovice rostoucí na aluviálních terasách jsou výrazně limitovány množstvím vody v řekách a tedy i v okolní půdě. Při vysokých stavech hladiny podzemní vody mají borovice výrazně menší radiální přírůsty (Polacek 2006).

### 4.3 Délka chronologií borovice a jejich síla

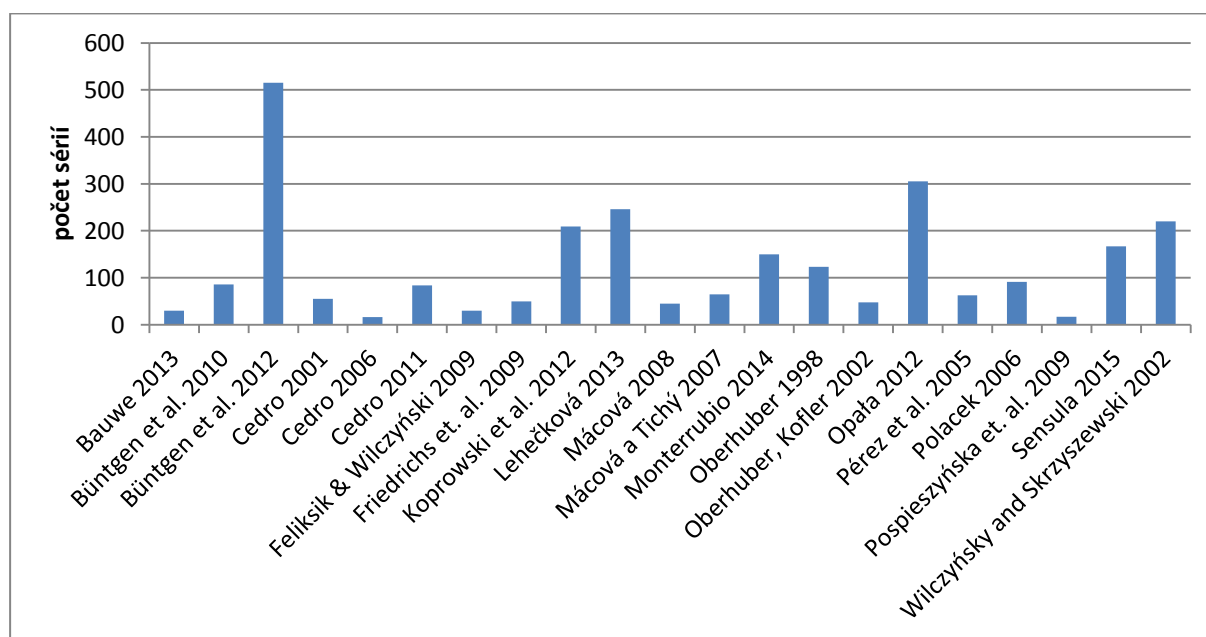
Délky chronologií jsou velice variabilní (Obr. 12) a odvíjejí se od počtu sérií v nich zahrnutých a od použitého materiálu. Dendroklimatické studie jsou založené především na vzorcích z živých stromů, ale některé zahrnují i vzorky získané ze starých staveb (Koprowski et al. 2012, Opała 2012), ty mívají tendenci dosahovat dále do minulosti. Obvykle bývá délka chronologií na živých stromech okolo 150 let, ale často se vyskytují i případy s délkou přes 300 let (Monterrubio 2014, Büntgen et al. 2012). Počet sérií zahrnutých v chronologii je také různorodý (Obr. 13). Většina autorů odebírá dostatečné množství vzorků pro kvalitní chronologii, ale ne vždy se podaří křížově datovat alespoň většinu (Pospieszyńska et al. 2009). Nicméně všeobecně jsou chronologie pokryty v každém roce alespoň 40 sériemi a některé práce vykazují i přes 100 sérií téměř po celé délce (Büntgen et al. 2012, Opała 2012). Co se týče síly korelací s klimatickými proměnnými, ty bývají v naprosté většině okolo 0,5 (Bauwe 2013, Cedro 2001, Pérez et al. 2005). V některých případech dosahují korelace i vyšších hodnot, např. práce Sensuly (2015), která studovala vliv imisí SO<sub>2</sub> na borovice a korelační koeficienty přesahovaly -0,6. To jsou ale případy stromu vyskytujících se na místech vystavených pouze jednomu významnému faktoru.

Obrázek 12: Délky letokruhových chronologií borovice lesní





**Obrázek 13: Počet sérií v chronologiích**



#### 4.4 Způsoby standardizace a typy chronologií

Významným problémem při sestavování letokruhových chronologií je růstový trend, který se odstraňuje celou řadou způsobů (Fritts 1976). Základním způsobem je odstranění trendu pomocí vytvoření indexované chronologie (Briffa and Melvin 2011). Ta dává do poměru pozorovaný růst vůči růstu ideálnímu simulovanému matematickou funkcí, nejčastěji negativní exponenciálou. Tento postup je používán poměrně často, ale v podstatě vždy v kombinaci se splinem o určité hodnotě (Lehečková 2013, Máková 2008, Polacek 2006). Matematická funkce spline má nastavitelné parametry, díky čemuž se dá přizpůsobit požadavkům práce. Základními parametry jsou délka okna splinu, tedy z kolika letokruhů se spočítá průměrná hodnota a množství snížené variability vlnové délky (Melvin and Briffa 2008). Využití samotného splinu můžeme pozorovat u řady prací (Büntgen et al. 2010, Friedrichs et al. 2009). Délky okna splinu jsou různé a záleží na předmětu výzkumu dané práce, nicméně často jsou využívány hodnoty přibližně 60–70 % průměrné délky sérií (Oberhuber, Kofler 2002, Máková a Tichý 2007). Některé práce pracují také s metodou RCS, např. Büntgen et al. (2012), která je vždy unikátní pro danou oblast (Briffa and Melvin 2011). Autokorelace šířek letokruhů v rámci let může mít vliv na výsledné hodnoty korelací a rekonstrukce, proto bývá poměrně často odstraňována a tím vznikají tzv. reziduální chronologie (Fritts 1976). Zároveň však odstraňuje část středně-frekvenční variability a tak některé studie pracují s jednoduchými standardními chronologiemi (Cedro 2001, Feliksik & Wilczyński 2009).

#### **4.5 Letokruhové signatury borovice lesní**

Na příčném řezu kmenem dřevin často narážíme na letokruhy, které jsou svojí šířkou výrazně odlišné od ostatních, ty se označují jako letokruhové signatury. Tyto růstové změny, ať už pozitivní, nebo negativní, jsou způsobeny různými faktory, ale hlavní příčinou bývá klima (Schweingruber 1996). Rozlišujeme „event years“, výrazné letokruhy zaznamenané pouze na jednom stromu a „pointer years“, které se projevují na celém stanovišti (Drápela a Zach 1995). V současnosti není určena konkrétní metodika určení letokruhových signatur, hodnotí se za pomoci prahových hodnot, nebo pouze vizuálně, záleží na výzkumníkovi (Bijak 2008). Neuwirth et al. (2007) zkoumali prostorové rozložení signatur v centrální Evropě a zjistili, že různé druhy dřevin mají odlišné reakce na mimořádné roky a shodují se pouze v případech extrémních letních veder. Na borovici lesní můžeme ve střední Evropě pozorovat celou řadu pointer years, mezi častěji pozorované patří úzké letokruhy v letech 1976 (Oberhuber 1998, Lehečková 2013) a 2003 (Sensula 2015, Bauwe 2013), což jsou roky, kdy nastala silná sucha. Výrazná pozitivní signatura je rok 1958, kterou uvádí Neuwirth (2007), Oberhuber (1998) a Lehečková (2013). Širší letokruhy bývají zaznamenány také v roce 1997 (Cedro 2006, Lehečková 2013). V těchto letech byly naopak zaznamenány silně nadprůměrné úhrny srážek.

### **5. Letokruhové chronologie z území České republiky a jejich klimatický signál**

#### **5.1 Pohraniční pohoří**

Na území České republiky vznikla celá řada chronologií citlivých na klima. Nejvíce takovýchto výzkumů je z oblasti pohraničních pohoří jako Krkonoše, Jeseníky, Slezské Beskydy, Krušné hory a další (Obr. 14). V podstatě všichni autoři zde studovali vliv klimatu na smrk ztepilý (*Picea abies*), který v nadmořských výškách okolo 1000 m dominuje. Z výsledků těchto prací jasně vyplývá, že zásadním klimatickým faktorem pro růst stromů jsou zde teploty převážně v letních měsících (Janda 2008, Brázdil 1997). Korelace s teplotami se v těchto oblastech průměrně pohybují okolo 0,5 (Tremel a kol. 2015, Rybníček 2010), ale např. Rydval a Wilson (2012) zaznamenali v Jizerských horách korelace až 0,67 s průměrnými teplotami od dubna do července.

V horských oblastech se samozřejmě mění vliv klimatu závislosti na nadmořské výšce. Například na Šumavě smrky okolo 1000 m n. m. korelovaly především s teplotami, v nižších polohách (750 – 950 m n. m.) a v podhůří Šumavy byl zaznamenán spíše vliv srážek (Čejková a Kolář 2009). V Krkonoších a Jeseníkách ve vyšších nadmořských výškách u horní hranice

lesa jsou zjevně hlavním růstovým faktorem teploty během června července, ale okolo 900 m n. m. už růst smrků neomezuje téměř nic (Ponocná a kol. 2016).

Na různých lokalitách, bývá rozdílný vliv srážek. V Krušných horách (Vejpustková 2008) a Orlických horách (Rybníček a kol. 2009, Vejpustková 2008) byly v nadmořských výškách mezi 880 a 1070 m zjištěny kladné korelace přibližně 0,45 se srážkami v červenci. Podobné působení srážek bylo také pozorováno ve Slezských Beskydech ve výšce okolo 600 m n. m., kde smrky vykazovaly vysoké korelace se srážkami během června (Čermák a kol. 2010). Ve stejných nadmořských výškách byl ovšem ve Slezských Beskydech též zjištěn výrazný vliv teplot na jaře, především v březnu (Rybníček 2010). V malé míře je studován klimatický signál také na borovici kleči. Ta v nejvyšších částech Krkonoš potvrzuje již zjištěný dominantní pozitivní vliv teplot na růst dřevin (Samusevich 2014).

V těchto horských oblastech je vždy potřeba zohledňovat také orientaci svahu vůči světovým stranám, její vliv je ovšem výrazně stanovištně rozdílný a a v nejvyšších polohách může být i zcela nevýznamný (Treml et al. 2012). Sander a kol. (1995) uvádí z montánního stupně, že smrky v Krkonoších na jižních svazích vykazovaly vliv teplot od května do srpna, stejně tak Treml et al. (2012) prokázali na jižních svazích pozitivní působení květnových teplot.

Na šířkách letokruhů jsou také dobře patrné imisní zátěže, které byly v České republice v 70. a 80. letech. V tomto období je patrná deprese a rozkolísanost šířek letokruhů (Janda 2008), přibližně od 90. let se situace zlepšila, což můžeme na letokruzích dobře pozorovat (Treml et al. 2012). Podobné trendy jsou patrné i na chronologiích z Krušných (Kroupová 2002) či z Jizerských hor (Rydval a Wilson 2012). V oblasti Sudetských pohoří byla také vytvořena dendroklimatická rekonstrukce teplot, jejíž první rok je 1603 a která dobře zachycuje chladný výkyv červnových a červencových teplot na počátku 18. století (Treml et al. 2015). Všeobecně se zdá, že v nižších výškách mezi 400–900 m n. m. stromy pozitivně reagují na srážky především během července a dalších letních měsíců, zatímco vliv teplot se projevuje až ve vyšších nadmořských výškách.

## **5.2 Nížinné oblasti**

Stromy v nížinných oblastech, většinou pod 400 m n. m., jsou ovlivňovány především množstvím srážek a suchem od března do července, jak dokazují např. práce Hoffmanna (2009) či Brázdila (2002). Obě tyto studie zkoumaly klimatické ovlivnění jedle bělokoré (*Abies alba*) na jižní Moravě za pomoci vzorků z živých stromů a z historických staveb. S těmito výsledky se dokonale shoduje také práce, kterou vytvořil Büntgen et al. (2011). I zde

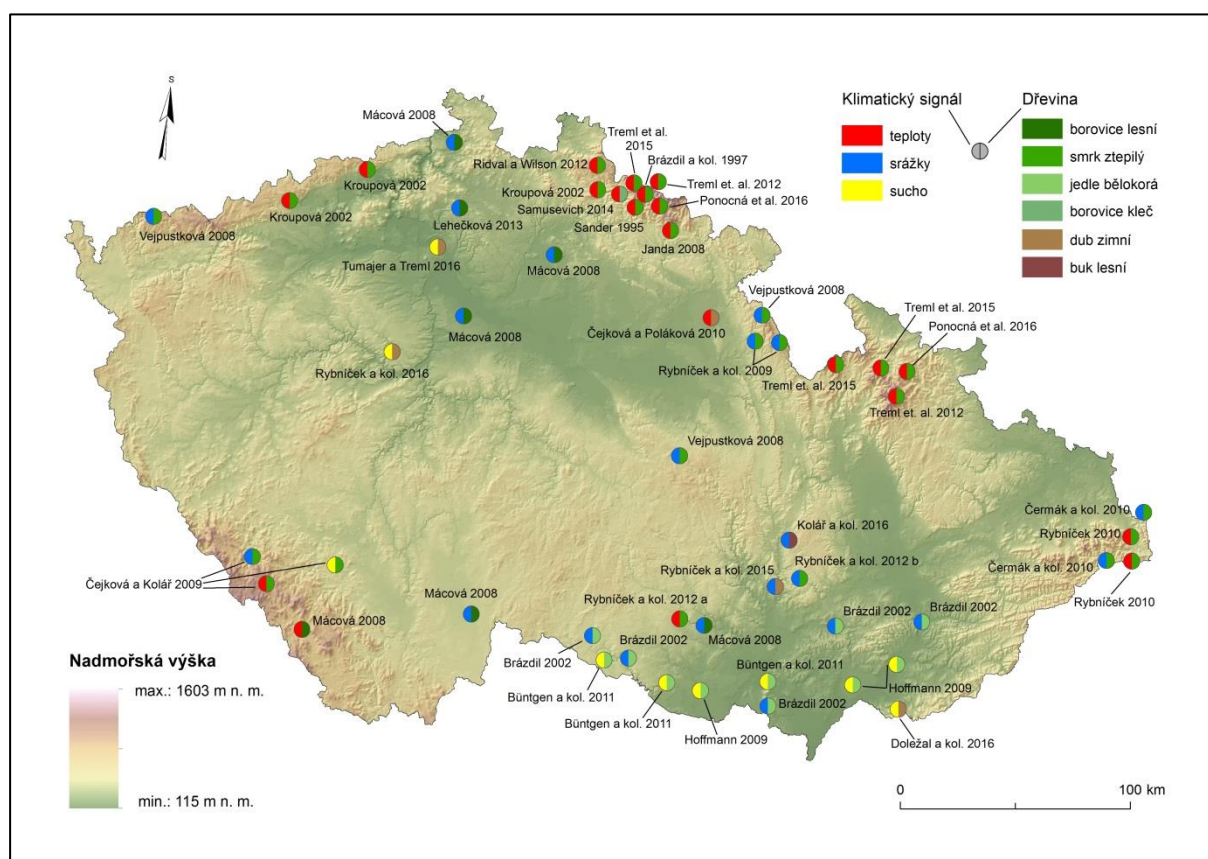


se projevil vliv sucha během léta a rekonstrukce zachycuje vlhkostní výkyvy až do roku 1500. Díky dostatečnému množství historického materiálu jedle bělokoré na jižní Moravě dosahují všechny tyto letokruhové chronologie délky přes 500 let. Přestože zásadním faktorem jsou v nížinách sucha a srážky, teplotní výkyvy zde svou roli hrají také (Brázdil 2002). Bylo zjištěno, že duby zimní (*Quercus petraea*) v Orlické tabuli, konkrétně v přírodní rezervaci Zbytka (260 m n. m.) reagují více právě na teploty od jara do konce léta, konkrétně od března do září (Čejková a Poláková 2010). V nížinách je dub poměrně často zkoumanou dřevinou. Na jihu Bílých Karpat, ve výšce okolo 430 m n. m. bylo zjištěno, že duby jsou primárně ovlivněny suchem. Nedostatek srážek a vysoké letní teploty zejména v posledních letech velmi negativně ovlivňují růst zdejších stromů, které jsou navíc následně náchylnější k nakažení (Doležal a kol. 2016). V podstatě stejné klimatické výsledky byly zjištěny na dubech v Českém krasu (320 m n. m.), kde mělo sucha (Relative Soil Moisture Content) dominantní vliv na všech čtyřech studovaných lokalitách během celého roku (Rybníček a kol. 2016). Tumajer a Tremel (2016) zkoumali klimatické ovlivnění dubů v lužních lesích v Polabí. I zde se projevilo sucha jako hlavní faktor růstu a to především v dubnu.

### 5.3 Českomoravská vrchovina

Klimatický signál v místech s nadmořskou výškou přibližně 500–700 m n. m. (pahorkatinách, vysočinách, vrchovinách) bývá zkoumán především na smrku, ale jsou též práce založené na buku či dubu. Ve Žďárských vrších bylo zjištěno, že radiální přírůsty smrků jsou nejvíce ovlivňovány letními srážkami a v září vykazují dokonce záporné korelace (-0,38) s teplotami (Vejpustková 2008). Podobné výsledky se ukázaly také v jihovýchodní části Českomoravské vrchoviny nedaleko Mohelna. Smrky zde reagovaly negativně na teploty během září a v letních měsících kladně na srážky (Rybníček a kol. 2012 a). V Dražanské vrchovině vzniklo hned několik prací reflektujících klimatický signál a každá na jiné dřevině. Kolář a kol. (2016) sestavil v chronologii na buku lesním (*Fagus sylvatica*) s délkou 114 let. Ukázalo se, že zásadním růstovým faktorem jsou letní, případně i jarní srážky. Ve stejné oblasti vznikla také smrková chronologie s dosahem do roku 1898, která vykazovala vliv srážek především v červnu (Rybníček a kol. 2012 b). Šířky letokruhů dubů zimních v Dražanské vrchovině potvrzují zjištěný pozitivní dopad množství srážek během května a června (Rybníček a kol. 2015). Ve všech zmíněných lokalitách se ukázaly být pro růst různých dřevin zásadní úhrny srážek v letních měsících a případný negativní dopad zářijových teplot.

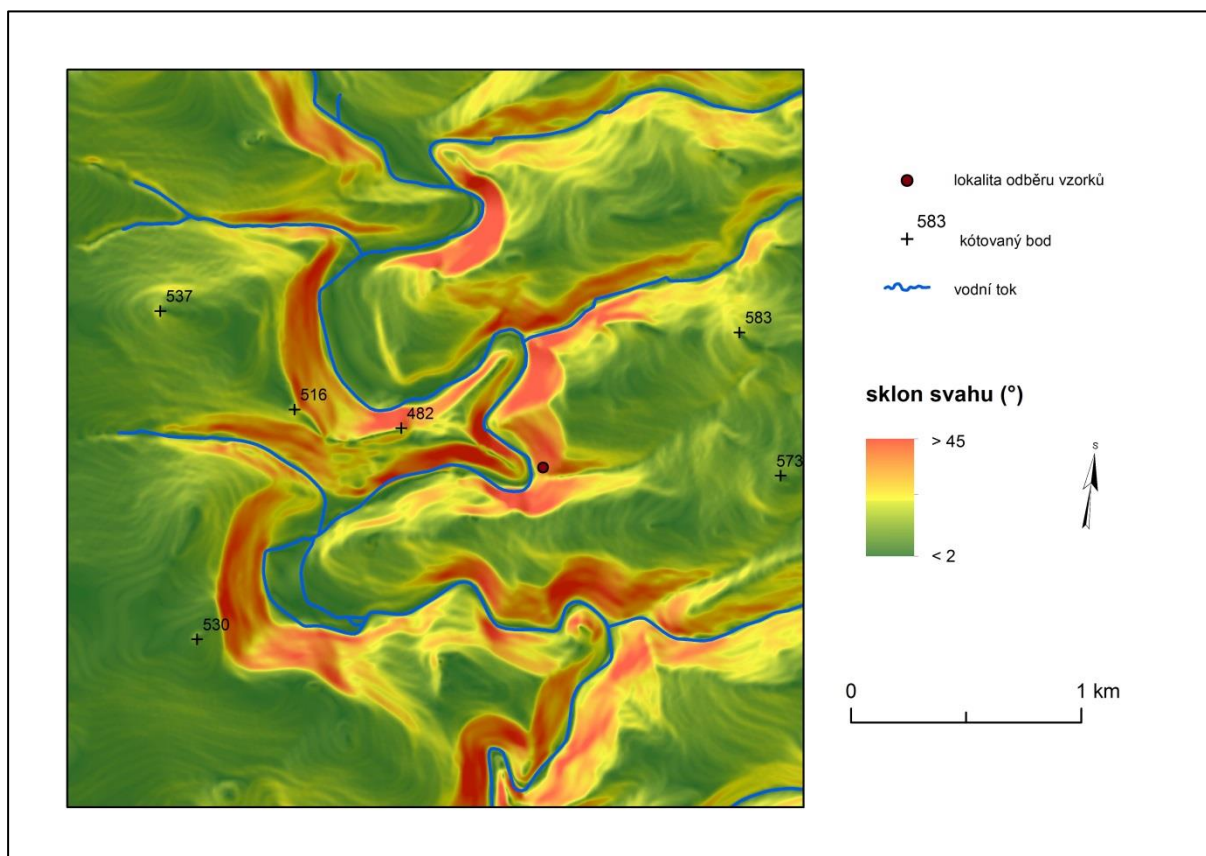
**Obrázek 14: Rozmístění letokruhových chronologií v ČR a jejich klimatický signál**



## 6. Fyzikogeografická charakteristika studovaného území

Zájmová lokalita se nachází v geomorfologickém okrsku Rabštejnská pahorkatina na severozápadě Poberounské soustavy. Jedná se o klínovitou hrást'ovou vyvýšeninu se zarovnaným povrchem, která od severu směrem na jih klesá z 600 m na 500 m n. m. (Bína a Demek 2012). Zarovnané povrchy jsou tvarovány mělkými úvalovitými depresemi, občasně vulkanickými suky (Demek a kol. 1965). Celkově má oblast střední sklon  $4^{\circ} 25'$  a je ohraničena ze tří stran (kromě jižní) výraznými zlomovými svahy s převýšením až 100 m (Bína a Demek 2012). Tyto tvary vzniklé neotektonickými procesy byly dále modelovány fluvialní erozí, která se nejvíce projevila erozním antecedentním údolím řeky Sřely se zaklesnutými meandry (Demek a kol. 1965) (Obr. 15). Lokality odběru vzorků se nacházejí všechny v téměř stejné nadmořské 427 m n. m. v západně orientovaném svahu se sklonem okolo  $28^{\circ}$ .

Obrázek 15: Sklonitost svahů ve studovaném území.



Geologické podloží je tvořeno převážně Barrandienskými fylity a metabazalty. Vyskytují se zde také arkózy, pískovce, jílovce, prachovce a slepence karbonského stáří. V neogénu zde sedimentovaly písky, jíly a jsou zde i ložiska břidlice zelené (Bína a Demek 2012, Geologická mapa 1 : 50 000). Na severozápadě jsou významně zastoupeny žuly a v malém množství nacházíme i granodiority z paleozoika (Demek a kol. 1965). V místech kde byly vzorky odebrány, je podloží tvořeno fylity tepelského krystalinika.

Na zmíněných žulách a fylitech se vyvinuly kyselé půdy, podle půdní mapy 1 : 50 000 především kambizemě dystrické a modální, které pokrývají naprostou většinu území. Podél celého toku Střely se nachází pás fluvizemí modálních na říčních sedimentech. V menší míře se pak objevují rankery, podzoly, gleje a pseudogleje. Právě na rankerech rostou borovice, z nichž byly pořízeny vrty.

Okolí Rabštejna nad Střelou spadá do klimatické oblasti MT4, která se vyznačuje krátkým mírným a suchým létem. Přechodná období jara a podzimu nejsou moc dlouhá a také bývají mírná. Zima je o něco delší, ale sněhová pokrývka se zde neudrží dlouho, protože teploty nesahají příliš hluboko pod bod mrazu (Quitt 1971). Průměrná teplota vzduchu se pohybuje mezi 8–9 °C. Srážkový stín Krušných hor mírně zasahuje i do této oblasti, díky tomu jsou zde

srážky pouze okolo 500 mm ročně (Tolasz a kol. 2007). V údolí Střely se silně projevuje expoziční klima a teplotní inverze (Culek a kol. 2013).

Culek a kol. (2013) řadí tuto oblast do Rakovnicko-Žlutického bioregionu. Ten zasahuje do dvou výškových vegetačních pásů a to do suprakolinního a částečně do submontánního. Podle mapy potenciální přirozené vegetace by v okolí Rabštejna nad Střelou měly být především dubohabřiny, ale v současnosti jsou zde lesní porosty tvořené hlavně smrkem a borovicí. Na svazích údolí Střely rostou reliktní bory, v okolí se daří jedlím a okolo samotného toku jsou lužní lesy. Díky zemědělství a odlesňování krajiny v minulosti se lesy v rámci celého bioregionu nachází především na kyselých písčitých půdách, neovulkanických sucích a svazích.

Napříč celým územím protéká řeka Střela, která tvoří jeho pomyslnou severojižní osu. Tato řeka pramení na hranici Tepelské vrchoviny a Slavkovského lesa v nadmořské výšce 678 m n. m. Celý její tok je peřejnatý a v okolí Rabštejna se zařezává do již zmíněného antecedentního údolí, ve kterém tvoří zaklesnuté meandry. V nejbližším okolí místa výzkumu do ní vtéká řada menších bezejmenných přítoků, významnější jsou až dále po proudu, jedná se především o Manětínský a Mladotický potok (Štefáček 2008).

## **7. Materiál a metodika**

### **7.1 Odběr vzorků**

Vzorky jader borovice lesní byly odebírány v PR Střela (50°2'32,799"N, 13°17'54,235"E) dne 13.10. 2016. Pro odběr byly vybírány dominantní stromy, které neměly žádné významné poškození (viditelně ulomený vzrostlý vrchol, nebo jiné deformace). Vrty byly pořízeny Presslerovým nebozezem ve standardní výšce 130 cm nad patou kmene a měly 5 mm v průměru. Aby vzorky neobsahovaly žádné reakční dřevo, které by mohlo zkreslit měření, byly odebírány vždy ve směru vrstevnice. Pokud byl vzorek viditelně poškozen např. hnilobou, byl odebrán nový vývrt. Celkově bylo úspěšně vyvrtáno 33 vzorků. U každého vrtaného stromu byla také změřena jeho výška a obvod.

### **7.2 Zpracování**

Získané vzorky byly ponechány po dobu jednoho týdne uložené v deskách, aby vyschly. Následně byly nalepeny na dřevěné lišty tak, aby jejich poloha odpovídala pozici ve stromu (příčný řez). Po té byly vývrty zbrušeny na pásové brusce brusným papírem postupně od nejhrubšího (80) po nejjemnější se zrnitostí 400 a ručně dobrušovány papírem o zrnitosti 600, díky čemuž byly dobře patrné i velmi tenké letokruhy.

Na takto zpracovaných vzorcích byly na příčném řezu pod mikroskopem změřeny šířky jednotlivých letokruhů s přesností na 0,01 mm. Mikroskop byl propojen s počítačem a dendrochronologickým programem PAST 4 (Knibbe 2004). Tímto způsobem vznikly křivky šířek letokruhů všech získaných vzorků, které ovšem nebyly jednoznačně datovány. Křížové datování bylo provedeno vizuálně a s pomocí statistických indexů (souběžnost, t test) v programu PAST 4. Série byly datovány vzájemně a oproti dalším chronologiím z ČR (Lehečková 2013, Mácová 2008).

Data byla dále zpracovávána v programu ARSTAN (Cook 1985) a statistickém programu R s doplňujícím balíkem dplR (Bunn 2008). V těchto programech byla provedena standardizace letokruhových sérií za účelem odstranění věkového trendu a vytvoření letokruhové chronologie (Cook and Kariukstis 1990). Protože každá metoda má své výhody a nevýhody, bylo použito více standardizačních postupů. Série byly standardizovány pomocí různých hodnot kubického splinu (délka okna 70, nebo 100 let), přítomností či absencí mocninné transformace hodnot (kvůli odstranění heteroskedacity, (Cook a Peters 1981) a výpočtem letokruhových indexů, jako poměrů, či reziduálů (Cook and Kariukstis 1990). U každé varianty byla vytvořena kromě standardní, také reziduální chronologie s odstraněnou autokorelací (Fritts 1976). Chronologie vznikly zprůměrováním sérií pomocí robustního průměru (odstraní odlehlé hodnoty). Takto vzniklo 12 různých variant chronologií (Tabulka 1). Získané chronologie mají délku 257 let a to od roku 1760 do 2016.

**Tabulka 1: Kombinace standardizačních metod u vytvořených chronologií**

Označení	Délka okna spline	Mocninná transformace	Výpočet letokruhového indexu	Odstranění autokorelace	Použitý program
<b>7nis</b>	70	ne	poměry	standardní	R
<b>7nir</b>	70	ne	poměry	reziduální	R
<b>7ars</b>	70	ano	reziduály	standardní	Arstan
<b>7arr</b>	70	ano	reziduály	reziduální	Arstan
<b>7nrs</b>	70	ne	reziduály	standardní	Arstan
<b>7nrr</b>	70	ne	reziduály	reziduální	Arstan
<b>10nis</b>	100	ne	poměry	standardní	R
<b>10nir</b>	100	ne	poměry	reziduální	R
<b>10ars</b>	100	ano	reziduály	standardní	Arstan
<b>10arr</b>	100	ano	reziduály	reziduální	Arstan
<b>10nrs</b>	100	ne	reziduály	standardní	Arstan
<b>10nrr</b>	100	ne	reziduály	reziduální	Arstan

### 7.3 Klimatická data

Data průměrných měsíčních srážek, teplot a hodnot Palmerova indexu sucha (PDSI) byla stažena z databáze Climatic Research Unit (CRU TS 3.1) (Mitchell and Jones 2005). Tato data, jsou dostupná pro celý svět v síti s rozlišením 0,5° a jsou získávána interpolací dat z klimatických stanic. Časové řady byly získány pomocí internetové aplikace KNMI Climate Explorer (<http://climexp.knmi.nl>) pro okno 12° 30'–13° a 50°–50° 30' za roky 1901–2015. Z těchto dat byly dále spočteny sezónní průměry za období od dubna do srpna (duben – květen, duben – červen, duben – červenec...), čímž vzniklo dalších deset klimatických řad.

### 7.4 Korelační analýza

Korelace chronologií s jednotlivými klimatickými proměnnými mohly být spočítány pouze za dobu překryvu těchto dat, tedy za roky 1901–2015. V programu DendroClim 2002 (Biondi and Waikul 2004) byly spočteny korelační koeficienty chronologií s měsíčními a sezónními průměry za aktuální i předchozí rok a jejich statistická významnost na 5% hladině (určeno permutačním testem).

### 7.5 Vyjádřený populační signál

Pro získané chronologie byl spočten vyjádřený populační signál (EPS), který je ukazatelem kvality chronologie. Ve výpočtu je zahrnut počet sérií v chronologii a jejich variabilita. Počítá se podle vzorce:

$$EPS = \frac{t * r_{bt}}{t * r_{bt} + (1 - r_{bt})}$$

Kde  $t$  je průměrný počet všech sérií a  $r_{bt}$  průměrná mezisériová korelace. Mez stanovená pro přijatelnou kvalitu chronologie je 0,85. Pakliže hodnota EPS klesne pod toto číslo, začíná být chronologie ovlivňována více variabilitou jednotlivých sérií než společným signálem. Chronologie může být stále vhodná pro archeologické datovací potřeby, ale ne pro dendroklimatický výzkum (Speer 2010). Vzhledem k tomu, že chronologie nebývají pokryty po celé délce stejným počtem vzorků, mohou dosahovat v různých částech různých hodnot EPS. Proto byly počítány klouzavé hodnoty EPS ve 40 letých oknech s překryvem 20 let. Pro dendroklimatickou rekonstrukci byla dále použita pouze část, která překročila mez 0,85 (Speer 2010).

### 7.6 Dendroklimatická rekonstrukce

Pro rekonstruování srážek byla použita jednak metoda lineární regrese a jednak metoda škálování. Obě tyto metody mají své nevýhody a úskalí. Například výsledky modelované metodou lineární regrese mají vždy menší rozptyl, než pozorovaná data. To jak moc se tyto

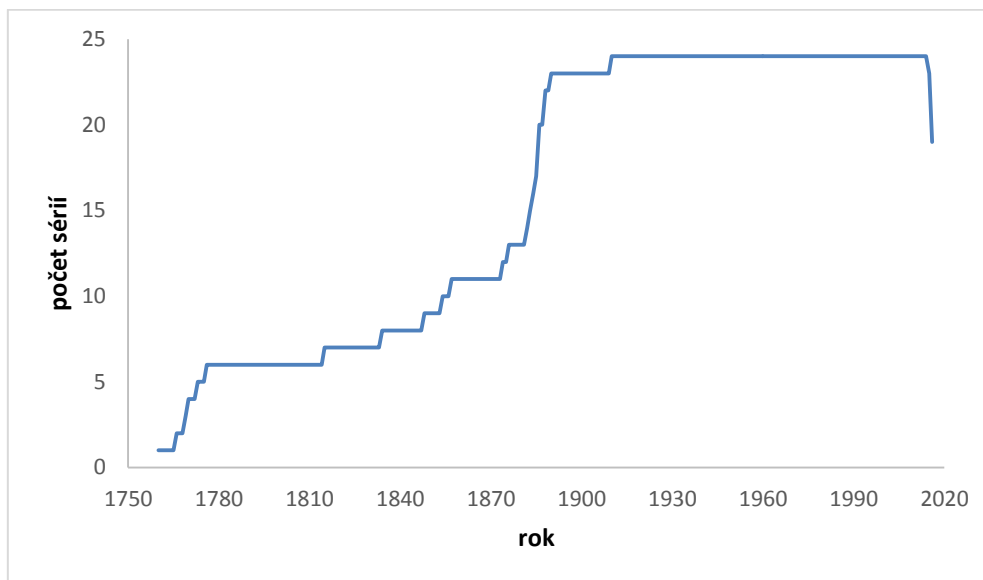
rozptyly liší, záleží na míře korelace pozorovaných dat (Esper et al. 2005). Vliv na amplitudu může mít také použitá délka okna kubického splinu. Při použití nízkofrekvenčního filtru (tedy dlouhého okna splinu), dojde k relativnímu zvýšení amplitudy výsledných dat. Metoda škálování, která spočívá ve vyrovnaní průměrů a směrodatných odchylek dat letokruhů a rekonstruované veličiny, naopak vede k homogenitě variability mezi instrumentálními a proxy daty, nicméně má tendenci zvýrazňovat extrémní hodnoty. Rozdíly mezi amplitudami těchto metod může dosahovat až 50 % (Esper et al. 2005).

## 8. Výsledky

### 8.1 Charakteristiky chronologií

Počet sérií, které byly nakonec zapojeny do chronologií, je menší než počet odebraných vzorků. Je tomu tak kvůli komplikovanému křížovému datování, při němž devět sérií neprošlo. Přestože od roku 1890 počet vzorků výrazně klesá (Obr. 16), hodnoty klouzavého EPS ukázaly, že chronologie je kvalitní až do roku 1850, což činí 167 let z celkové délky 257. Naměřené série dosahovaly v průměru délky 168 let. Šířky letokruhů nebyly nijak výrazně variabilní a všeobecně se pohybovaly okolo 1 mm (Tabulka 3).

Obrázek 16: Počet vzorků obsahujících letokruh v jednotlivých kalendářních letech



Získané chronologie (Obr. 17 – Obr. 20) jsou navzájem odlišné, ale některé mají určité společné rysy. Průběh všech chronologií je podobný, v podstatě veškeré vytvořené chronologie mají na počátku široké letokruhy, které se ale silně zužují směrem k roku 1778. Později se šířky letokruhů pohybují okolo průměru, až k roku 1835 kdy silně klesají. Následuje rychlý nárůst okolo 1846 a silná deprese na počátku druhé poloviny 19. stol. V 80.

letech tohoto století jsou letokruhy poměrně široké, ale od počátku 20. stol. se šířky pohybují okolo průměru až na výjimky významných let, kdy ale nepřesahují hodnoty 1,5 ani 0,5.

Z korelací mezi nimi navzájem, (Tabulka 2) je patrné, že délka splinu nezpůsobuje moc odlišné hodnoty, zřejmě kvůli malému rozdílu délek okna splinu. Korelace mezi chronologiemi vytvořenými stejným postupem pouze s rozdílem okna splinu (např. 7ars a 10ars) jsou okolo 0,98. Naopak výrazný vliv na podobnost chronologií má odstranění autokorelace. Ve většině případů jsou si velmi podobné pouze standardní, nebo naopak reziduální chronologie. Všeobecně mezi sebou více korelují standardní chronologie a po odstranění autokorelace korelační koeficient klesá, ale nijak významně. Zajímavé je, že spolu silně korelují chronologie vzniklé úplně jiným způsobem, konkrétně 7ars a 10nps, shodující se pouze v tom, že jsou obě standardní.

**Tabulka 2: Korelační koeficienty mezi chronologiemi**

	<b>7arr</b>	<b>7ars</b>	<b>7npr</b>	<b>7nps</b>	<b>7nrr</b>	<b>7nrs</b>	<b>10arr</b>	<b>10ars</b>	<b>10npr</b>	<b>10nps</b>	<b>10nrr</b>	<b>10nrs</b>
<b>7arr</b>	1,00	0,86	0,94	0,84	0,88	0,75	0,98	0,84	0,93	0,83	0,89	0,72
<b>7ars</b>		1,00	0,83	0,96	0,72	0,89	0,79	0,99	0,77	0,97	0,70	0,87
<b>7npr</b>			1,00	0,86	0,87	0,72	0,93	0,79	0,97	0,84	0,88	0,69
<b>7nps</b>				1,00	0,71	0,86	0,76	0,94	0,81	0,98	0,70	0,83
<b>7nrr</b>					1,00	0,75	0,90	0,68	0,86	0,71	0,99	0,71
<b>7nrs</b>						1,00	0,68	0,87	0,64	0,89	0,72	0,98
<b>10arr</b>							1,00	0,76	0,93	0,76	0,91	0,66
<b>10ars</b>								1,00	0,74	0,96	0,67	0,87
<b>10npr</b>									1,00	0,79	0,89	0,62
<b>10nps</b>										1,00	0,70	0,89
<b>10nrr</b>											1,00	0,69
<b>10nrs</b>												1,00

Chronologie vzniklé kombinací bez mocninné transformace a s indexy počítanými jako reziduály silně zvýrazňují šířky několika prvních let chronologie a to jak standardní, tak reziduální varianty. Konkrétně můžeme uvést rok 1767, který se projevil jako silně pozitivní u všech kombinací a později rok 1846. Negativní roky jsou 1788, jasně patrný u standardních, a rok 1769 viditelný spíše na reziduálních variantách. Celkově jsou šířky letokruhů u těchto kombinací poměrně hodně rozkmitané, což potvrzují hodnoty směrodatných odchylek především u standardních variant těchto chronologií (Tabulka 3). O něco menší směrodatné odchylky šířek letokruhů mají zbylé standardní chronologie a pak reziduální. Evidentně významně negativní roky byly 1835 a 1976, které jsou patrné především na standardních chronologiích vzniklých jakýmkoli způsobem. Stejně tak roky 1842 a 2003, měly negativní

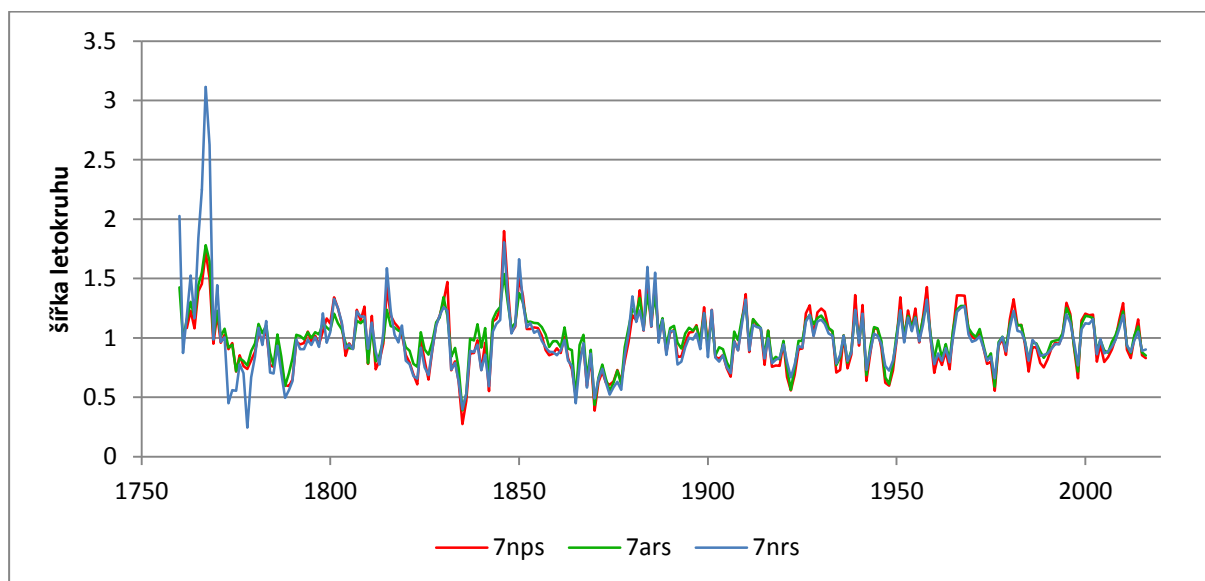


vliv na růst borovic v této lokalitě. Ty jsou naopak dobře zachyceny hlavně na reziduálních chronologiích.

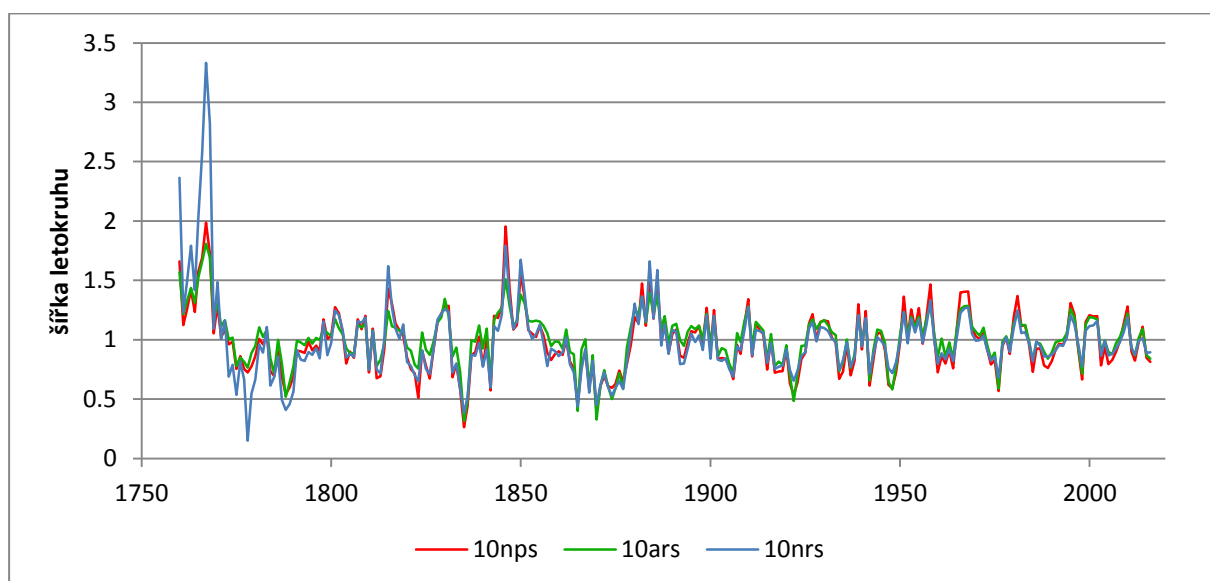
Tabulka 3: Popisné statistiky chronologií

	Průměrná šířka letokruhů	Směrodatná odchylka
<b>7nps</b>	0,976986	0,238247
<b>7npr</b>	0,976054	0,2124
<b>7ars</b>	1,003051	0,200075
<b>7arr</b>	1,005054	0,160568
<b>7nrs</b>	0,983358	0,301038
<b>7nrr</b>	0,9883	0,212326
<b>10nps</b>	0,977541	0,259635
<b>10npr</b>	0,972607	0,215129
<b>10ars</b>	1,007856	0,218933
<b>10arr</b>	1,005451	0,155648
<b>10nrs</b>	0,984829	0,336974
<b>10nrr</b>	0,987665	0,206383

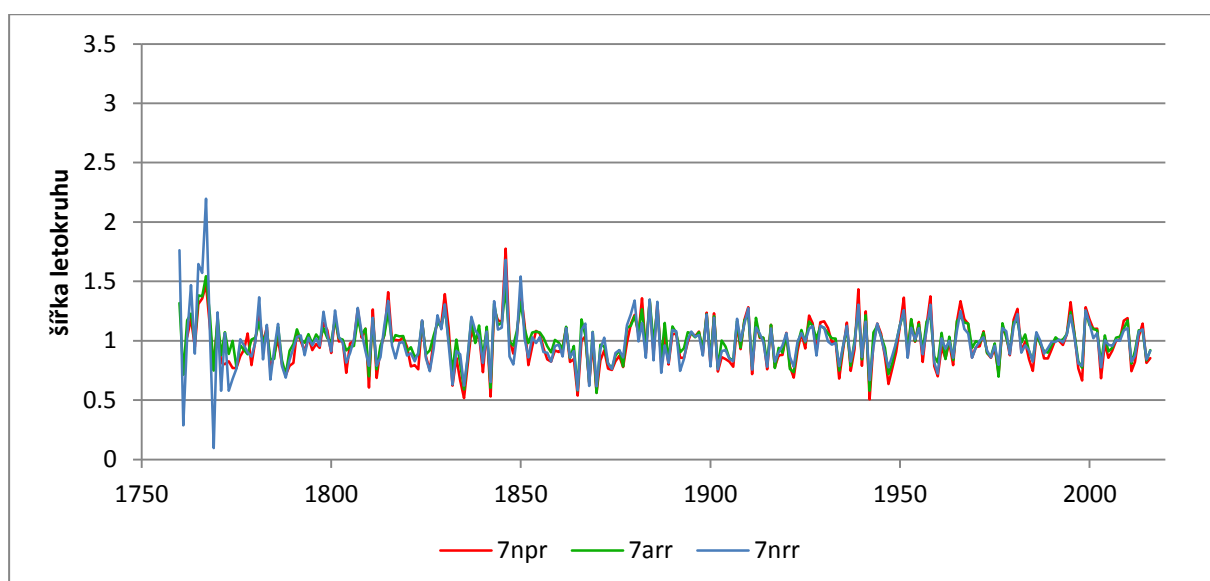
Obrázek 17: Standardní letokruhovové chronologie 7nps, 7ars, 7nrs



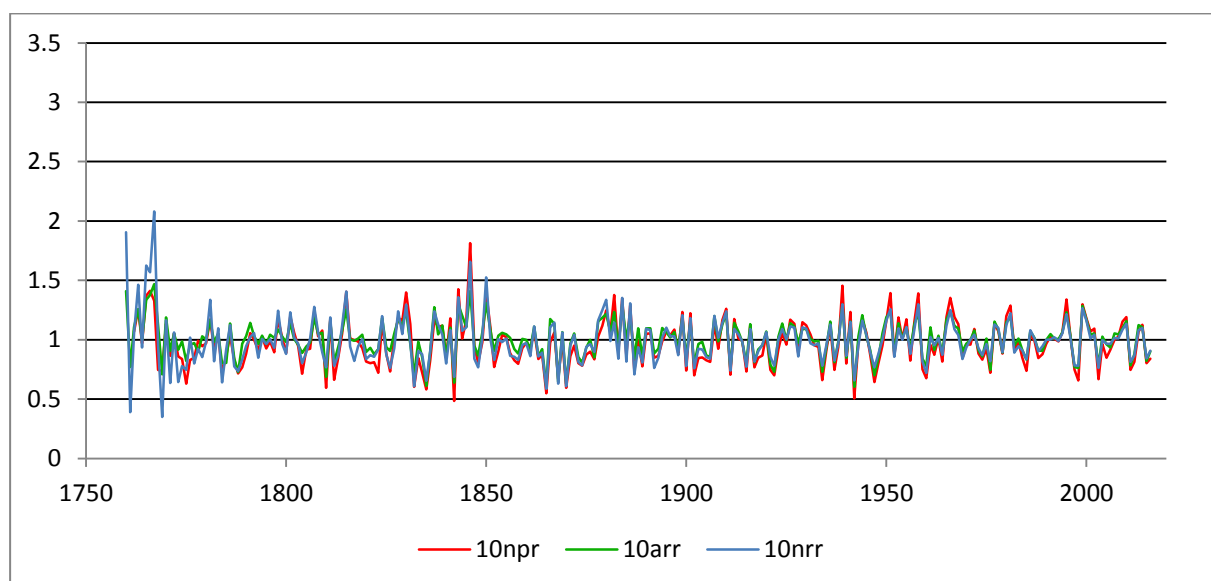
Obrázek 18: Standardní letokruhové chronologie 10nps, 10ars, 10nrs



Obrázek 19: Reziduální letokruhové chronologie 7npr, 7arr, 7nrr



Obrázek 20: Reziduální letokruhové chronologie 10npr, 10arr, 10nrr



## 8.2 Klimatické proměnné ovlivňující růst

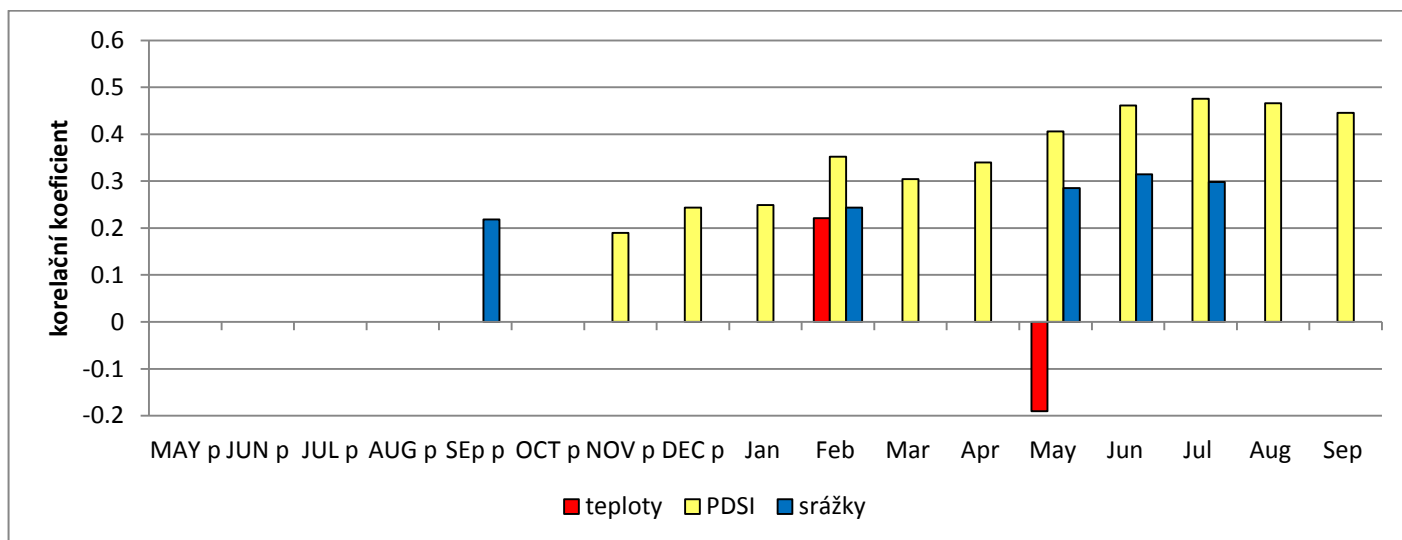
Všechny vytvořené chronologie vykazaly stejné klimatické ovlivnění průměrnými teplotami, srážka i indexem sucha PDSI, rozdíly v hodnotách korelačních koeficientů nebyly vysoké. V tabulce 4 jsou uvedeny nejvyšší korelace všech chronologií s měsíčními a sezónními průměry klimatických proměnných. Červeně jsou zvýrazněny nejvyšší korelace reziduálních chronologií s měsíčními a sezónními průměry, stejně tak pro chronologie standardní, které jsou zvýrazněny modře.

Tabulka 4: Hodnoty nejvyšších korelací chronologií s klimatickými proměnnými.

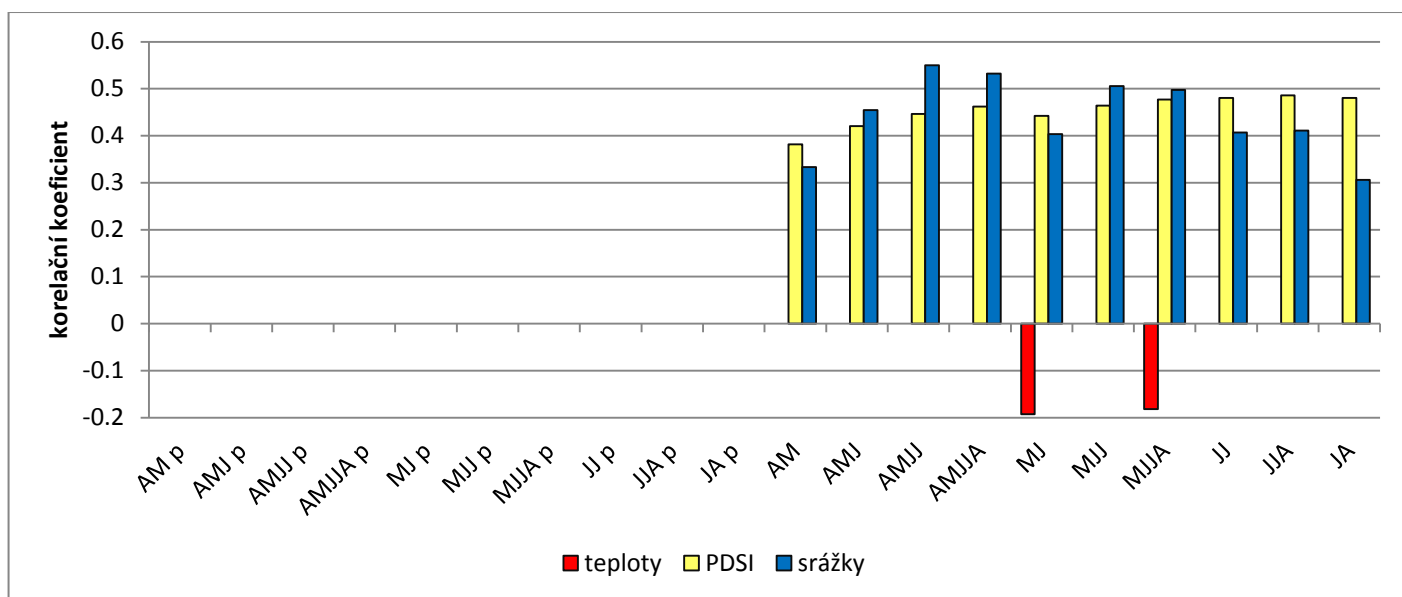
Označení	Nejvyšší korelace s měsíčními průměry	Korelovaná proměnná	Nejvyšší korelace se sezónními průměry	Korelovaná proměnná
7nps	0,4707	PDSI v září	0,4706	PDSI JJA
7npr	0,4802	PDSI v červenci	0,5059	srážky AMJJ
7ars	0,4522	PDSI v červenci	0,4535	srážky AMJJA
7arr	0,4759	PDSI v červenci	0,5275	srážky AMJJ
7nrs	0,4596	PDSI v září	0,4588	PDSI JJA
7nrr	0,4851	PDSI v červenci	0,5318	srážky AMJJ
10nps	0,4546	PDSI v září	0,4530	PDSI JJA
10npr	0,4719	PDSI v červenci	0,5134	srážky AMJJ
10ars	0,4331	PDSI v červenci	0,4508	srážky AMJJA
10arr	0,4752	PDSI v červenci	0,5485	srážky AMJJ
10nrs	0,4361	PDSI v červenci	0,4401	srážky MJJA
10nrr	0,4759	PDSI v červenci	0,5394	srážky AMJJ

Šířky letokruhů borovice lesní jsou v relativně silné korelaci především se sezónními srážkami a indexem sucha PDSI. Ukázalo se, že hodnoty žádné klimatické proměnné nemají významný vliv v předcházejícím roce růstu. Pouze srážky v srpnu a index sucha v listopadu a prosinci předchozího roku vykázaly určité signifikantní korelace, které ovšem jen lehce překračují hodnotu 0,2. Zajímavé je, že přestože vliv teplot je všeobecně pro stromy omezujícím faktorem, bylo zde pozorováno pozitivní ovlivnění teplotami v únoru. Vliv indexu sucha PDSI je evidentně silný jak u měsíčních, tak u sezónních průměrů. U měsíčních korelací dobře vidět pozvolný nárůst k největším hodnotám v letních měsících od června do srpna a následně pokles až do konce dendrochronologického roku (Obr. 29). Hodnoty sezónních korelací PDSI jsou během aktuálního roku poměrně vyrovnané a pohybují se přibližně okolo 0,45. Na úrovni měsíčních korelací šířek letokruhů se srážkami jsou hodnoty korelací nízké, pouze v červnu přesáhl korelační koeficient hranici 0,3. Korelace se sezónními průměry srážek však ukázala silný pozitivní dopad a to téměř ve všech obdobích (Obr. 30). Nejsilnější byl především u proměnných zahrnujících nejvíce měsíců (4–5). V těchto případech byly korelace nad 0,5, kromě sezóny od května do srpna, kdy byla 0,497. Vůbec nejsilněji letokruhové chronologie korelovaly s průměrnými srážkami za sezónu od dubna do července. V tomto období dosáhl korelační koeficient hodnoty 0,549.

**Obrázek 21:** Korelační koeficienty mezi chronologií 10arr a průměrnými měsíčními hodnotami teplot, indexu sucha PDSI a srážek za dendrochronologický rok. Zobrazeny jsou pouze korelace statisticky významné na hladině 0,05 %. Chronologie 10arr byla vybrána, protože dosáhla nejvyšších hodnot korelačních koeficientů.



Obrázek 22: Korelační koeficienty mezi chronologií 10arr a průměrnými sezónními hodnotami teplot, indexu sucha PDSI a srážek. Zobrazeny jsou pouze korelace statisticky významné na hladině 0,05 %.



### 8.3 Dendroklimatická rekonstrukce

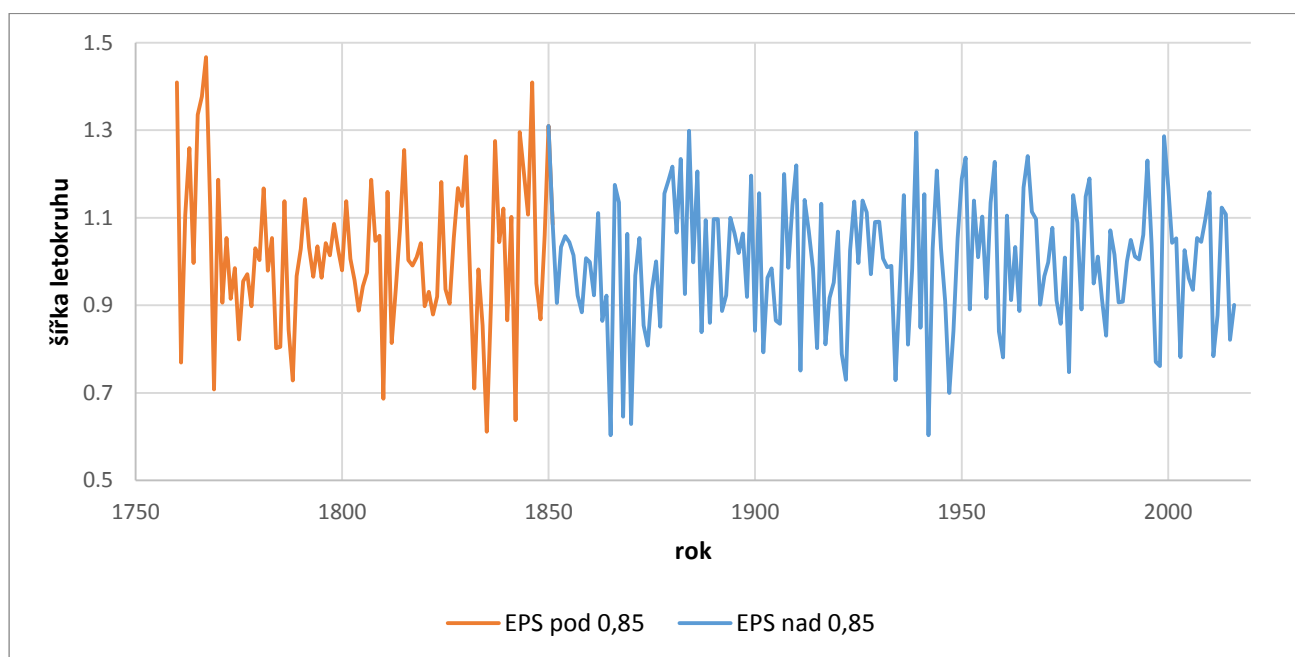
Na základě korelačních koeficientů, které ukazují poměrně silný vztah mezi šířkami letokruhů a průměrnými sezónními srážkami od dubna do července byla pro dendroklimatickou rekonstrukci byla vybrána reziduální chronologie s označením 10arr, která dosáhla nejvyšší korelace ze všech a to 0,549. Hodnoty klouzavého EPS ukázaly, že z celkové délky 257 let je pro rekonstrukci vhodná část od roku 1850 do 2016. Zde byla překročena hraniční hodnota 0,85. Samotnou chronologii 10arr můžeme vidět na Obr. 31, kde je modře zvýrazněna část, pro kterou byla následně provedena dendroklimatická rekonstrukce. Výsledný vztah mezi šířkami letokruhů ( $x$ ) a srážkami za období duben – červenec ( $y$ ) byl určen lineární regresí na

$$y = 46,696x + 17,923$$

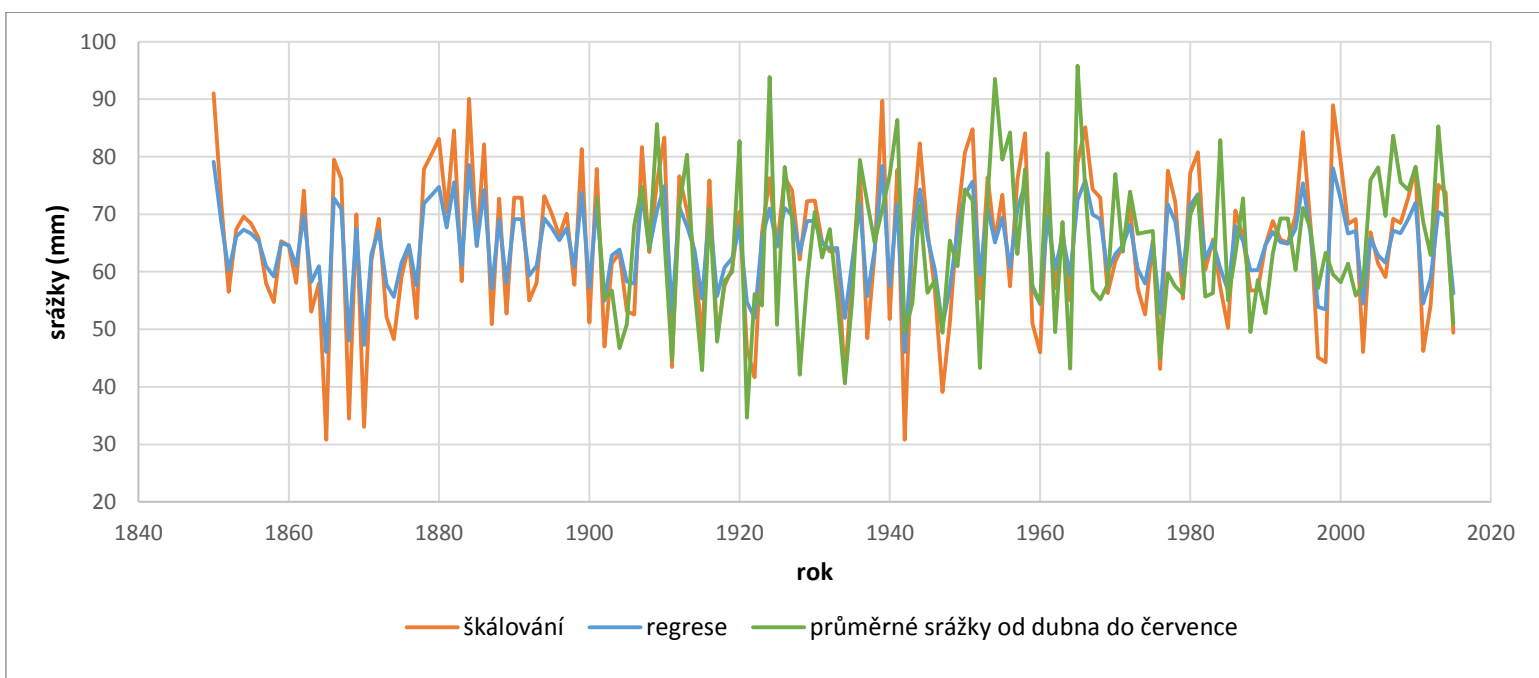
Koeficient determinace zde vyšel 0,3009, což není hodnota nijak vysoká, ale u dendroklimatických rekonstrukcí poměrně obvyklá.

Na obrázku č. 32 můžeme vidět výsledky dendroklimatické rekonstrukce pomocí regrese a škálování.

Obrázek 23: Letokruhová chronologie 10arr



Obrázek 24: Výsledky dendroklimatické rekonstrukce



## 9. Diskuse

### 9.1 Odezva na klima

Výsledné korelační koeficienty byly porovnány s prací Lehečkové (2013), která zjišťovala vliv klimatu na borovice lesní v několika lokalitách na Kokořínsku. Ukázalo se, že borovice vykazují velice podobný klimatický signál. Obě práce se shodují na minimálním vlivu teplot. Ty bývají často omezující pro růst stromů na obou lokalitách, kromě února. Teplotní průměry za únor měli vždy pozitivní vliv ( $r=0,22$ ), což uvádí také řada jiných prací na borovici ve střední Evropě (Mácová 2008, Feliksik & Wilczyński 2009). Index sucha PDSI rovněž vykázal podobné výsledky. Na korelačních koeficientech je vidět pozvolný nárůst hodnot již od zimy až do července ( $r=0,48$ ) a následně lehký pokles v srpnu. Přestože je tento vliv velmi podobný, borovice u Rabštejna nad Střelou vykazovaly s PDSI všeobecně vyšší korelace. V obou studiích se ukázaly srážky jako nejdůležitější faktor růstu stromů. Měsíční korelace vyšly téměř naprosto shodně. Slabý dopad ( $r=0,22$ ) srážek v předchozím září a současném únoru a následně silnější korelace v květnu, červnu a červenci. Velice podobný dopad množství srážek zaznamenala také Mácová 2008. Největší vztah měly všechny chronologie k sezónním srážkám od jarních měsíců do konce léta. Různé kombinace těchto sezón vykazovaly korelace okolo 0,5.

### 9.2 Významné roky

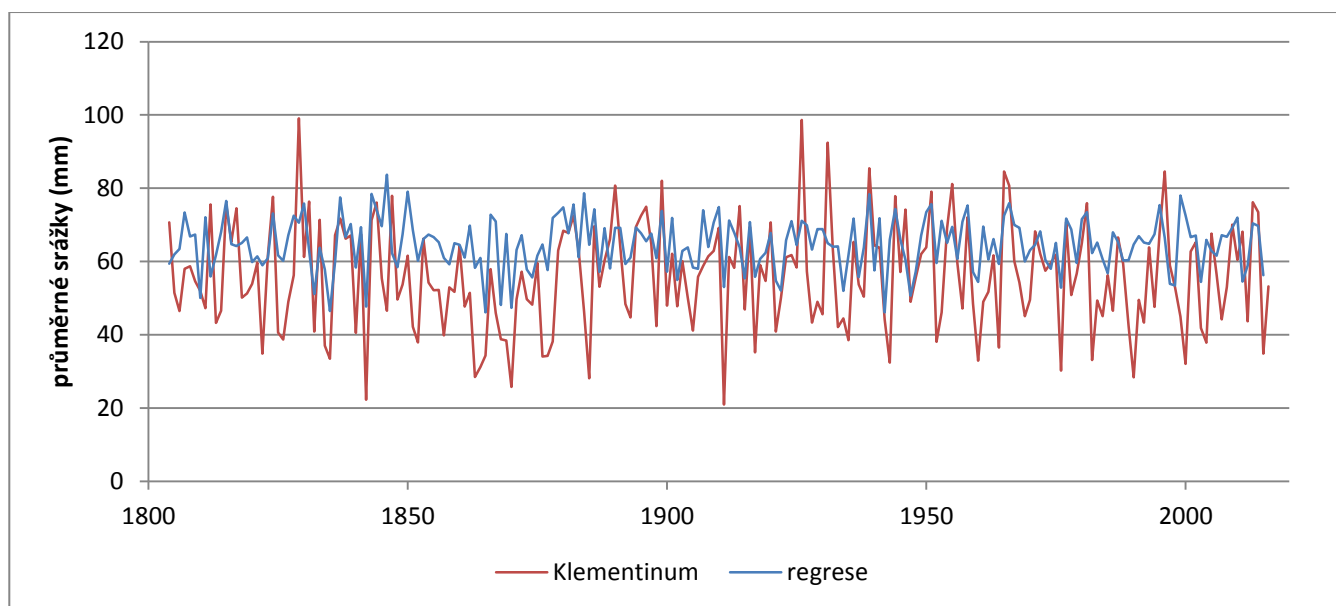
Na vytvořených chronologiích bylo pozorováno hned několik letokruhových signatur, které jsou uváděny i v jiných studiích ve střední Evropě. Velice dobře patrný je rok 1976, který bývá často udáván jako negativní pointer year (Oberhuber 1998, Lehečková 2013). V tomto roce totiž nastalo silné sucho, od února do září spadlo přibližně 240 mm srážek. Obvykle spadne za tuto dobu až 400 mm a je jasné, že pro borovice, které silně reagují právě na srážky, měla tato situace nepříznivý dopad. Podobný negativní dopad měl rok 2003, kdy bylo sucho a průměrné hodnoty PDSI se pohybovaly okolo -2,5. Tento rok byl zachycen také v Braniborsku (Bauwe 2013) a Polsku (Sensula 2015). Jako pozitivní rok se ukázal 1910, kdy naopak spadlo hodně srážek a PDSI byl po celé vegetační období přibližně 2. Přestože na vytvořených chronologiích (zejména standardních) je velmi dobře patrný, jako kladnou signaturu jej uvádí pouze Lehečková (2013), jinde zřejmě pozorován nebyl. Naopak často uváděný rok je 1958 (Oberhuber 1998, Neuwirth 2007, Lehečková 2013). Tehdy bylo velice deštivo, za celý dendrochronologický rok spadlo přibližně 1150 mm srážek, což se projevilo zvětšením šířek letokruhů. Prokazatelně pozitivní vliv mělo také klima v roce 1939, kdy byly

poměrně nízké teploty a silné srážky (480 mm za vegetační období), což potvrzuje Lehečková (2013).

### 9.3 Porovnání dendroklimatických rekonstrukcí

Vytvořená dendroklimatická rekonstrukce srážek od dubna do července byla porovnána s výsledky jiných studií a s klimatickou řadou ze stanice v Klementinu. Po porovnání s těmito zdroji se zdá vytvořená rekonstrukce relativně dobrá i před rokem 1850, kdy již chronologie není moc kvalitní. V Klementinu byly srážky měřeny až od roku 1804, z těchto dat byly spočteny průměrné srážky za sezónu AMJJ a korelace se srážkovou řadou získanou z CRU (na základě které byla vytvořena rekonstrukce) je 0,55. Rekonstruované srážky korelují s klementinskou řadou relativně dobře ( $r=0,5$ ) (Obr. 25). Určité významné roky byly pozorovány i na jiných dendroklimatických srážkových rekonstrukcích. Negativní rok 1835 byl zaznamenán v Alpách (Oberhuber a Kofler 2002) a v Bavorsku (Wilson a kol. 2005) a obě tyto práce též potvrzují srážkově slabý rok 1976. Již zmíněný rok 2003 pozorovaný v Polsku a Braniborsku se jasně projevil i v Alpách (Casty a kol. 2005). Wilson a kol. (2005) a Casty a kol. (2005) také zaznamenali příznivý dopad roku 1910. Zajímavé je, že rok 1842, který se u Rabštejna projevil jako silně negativní, žádná práce neuvádí. Je možné, že tento nedostatek srážek byl způsoben konkrétními fyzickogeografickými podmínkami ve studovaném území, ale silně podprůměrné srážky zachytila též stanice v Klementinu, která je vzdálená přibližně 80 km.

Obrázek 25: Průběh srážek z Klementina a spočítaných regresí





#### **9.4 Má chronologie potenciál?**

Přestože se vytvořená rekonstrukce v určitých letech neshoduje s jinými, v řadě aspektů se zdá být kvalitní a zřejmě skrývá určitý potenciál. Pro zlepšení chronologie a následně i dendroklimatické rekonstrukce, by bylo vhodné zařadit do ní více vzorků. Tím by se zkvalitnil její průběh před rokem 1850 a případně by se i prodloužila dále do minulosti. Procedura, která by výrazně pomohla zjištění klimatického signálu, je spočtení klouzavých korelačních koeficientů se zkoumanými proměnnými. Je možné, že chronologie je v určitém období více citlivá na srážky než jindy a klouzavé korelace by tento fakt odhalily. Pro lepší odhad kvality rekonstrukce by dále bylo možné spočítat kalibrační a verifikační statistiky, čímž by se zjistilo, která metoda, regrese, či škálování, dokumentuje srážky přesněji.

### **10. Závěr**

Na území střední Evropy bylo zjištěno 21 studií, které popisují klimatické ovlivnění borovice lesní v různých prostředích. Většina těchto studií udává dominantní vliv teplot a to zejména ve Velkopolské a Severoněmecké nížině. Časté je také teplotní ovlivnění v horských oblastech. Reakce na srážky jsou často pozorovány na území České republiky a ze suchých vnitrohorských údolí Alp. Vliv Palmerova indexu sucha je udáván poměrně často, ale málokdy je tím nejvýznamnějším. Jako určující byl zjištěn ve Středoněmecké vysočině a na Slovensku.

V rámci České republiky je pro dendroklimatické studie primárně používán smrk ztepilý, dub zimní a případně jedle bělokorá, ale objevují se i práce na buku lesním, borovici kleči a v několika případech i borovice lesní. Přestože je to druh s přirozeným výskytem na téměř celém našem území, je jeho zastoupení mezi letokruhovými chronologiemi malé.

Celkově lze klimatický signál dřevin v ČR rozdělit do kategorií podle nadmořské výšky. V horských oblastech, přibližně nad 700 m, jsou naprosto zásadním faktorem teploty. Pouze na čtyřech lokalitách z 22 se projevíly srážky jako významnější pro růst stromů, což může být způsobeno specifickými fyzickogeografickými podmínkami konkrétních lokalit. Jako další oblast se dají vymezit vrchoviny, vysočiny a nížiny, kde dřeviny reagují především na množství srážek. V nadmořských výškách okolo 500 m n. m. a níže nacházíme práce dokumentující především reakce na srážky a indexy sucha, např. v Českomoravské vysočině, jižní Moravě a Polabské nížině.

Výsledky praktické části této práce jsou se zjištěnými informacemi o růstových trendech borovice lesní a jiných dřevin v dobré shodě. Prokázala, že v lokalitě u Rabštejna nad Střelou reagují borovice lesní silně na index sucha a srážkové úhrny.

Vytvořená dendroklimatická rekonstrukce srážek v období od dubna do července se po srovnání s jinými rekonstrukcemi zdá být relativně spolehlivá. Určité významné roky často pozorované v jiných studiích zde byly zachyceny také a shoda s klementinskou klimatickou řadou je poměrně vysoká.

## 11. Literatura

- Abraham, V., Kuneš, P., Petr, L., Svitavská Svobodová, H., Kozáková, R., Jamrichová, E., Pokorný, P. (2016). A pollen-based quantitative reconstruction of the Holocene vegetation updates a perspective on the natural vegetation in the Czech Republic and Slovakia. *Preslia*, 88(4), 409–434.
- Bauwe, A., Koch, M., Kallweit, R., Konopatzky, A., Strohbach, B., & Lennartz, B. (2013). Tree-ring growth response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to climate and soil water availability in the lowlands of northeastern Germany. *Baltic Forestry*, 19(2), 212–225.
- Bijak, S. (2008). Various factors influencing the pointer year analysis. *TRACE–Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, 6, 77–82. Retrieved from [treering.de/sites/default/files/TRACE.../Bijak\\_TraceVol\\_6.pdf](http://treering.de/sites/default/files/TRACE.../Bijak_TraceVol_6.pdf)
- Bína, Jan a Jaromír Demek (2012). *Z nížin do hor: geomorfologické jednotky České republiky*. Praha: Academia, Průvodce (Academia). ISBN 978-802-0020-260.
- Bradley, Raymond S. *Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary* (1999). 2nd ed. San Diego, CA: Academic Press, ISBN 978-0121240103.
- Brázdil, R., Dobrý, J., Kyncl, J., & Štěpánková, P. (1997). Rekonstrukce teploty vzduchu teplého půlroku v oblasti Krkonoš na základě letokruhů smrku v období 1804–1989. *Sborník České Geografické Společnosti*, 102(1), 3–16.
- Brázdil, R., Štěpánková, P., Kyncl, T., & Kyncl, J. (2002). Fir tree-ring reconstruction of March–July precipitation in southern Moravia (Czech Republic), 1376–1996. *Climate Research*, 20(3), 223–239. <https://doi.org/10.3354/cr020223>
- Briffa K. R., Melvin T. M. (2011): A Closer Look at Regional Curve Standardization. In: Hughes M.K., Swetnam T. W., Diaz H. F. (eds.): *Dendroclimatology: Progress and Prospects*. SpringerVerlag, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, s. 113–145.
- Büntgen, U., Brázdil, R., Frank, D., & Esper, J. (2010). Three centuries of Slovakian drought dynamics. *Climate Dynamics*, 35(2–3), 315–329. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0563-2>
- Büntgen, U., Brázdil, R., Dobrovolný, P., Trnka, M., & Kyncl, T. (2011). Five centuries of Southern Moravian drought variations revealed from living and historic tree rings. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(1), 167–180
- Büntgen, U., Kaczka, R. J., Trnka, M., & Rigling, A. (2012). Agricultural and Forest Meteorology Ensemble estimates reveal a complex hydroclimatic sensitivity of pine growth at Carpathian cliff sites.
- Businský, Roman a Jiří Velebil (2011). *Borovice v České republice: výsledky dlouhodobého hodnocení rodu Pinus L. v kultuře v České republice*, Průhonice: Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, ISBN 978-80-85116-90-8.

- Casty, C., Wanner, H., Jürg, L., Esper, J., & Böhm, R. (2005). TEMPERATURE AND PRECIPITATION VARIABILITY IN THE EUROPEAN ALPS SINCE 1500.
- Cedro, A. (2001). DEPENDENCE OF RADIAL GROWTH OF PINUS SYLVESTRIS L. FROM WESTERN POMERANIA ON THE RAINFALL AND TEMPERATURE CONDITIONS. *Geochronometria*, 20, 69–74.
- Cedro, A. (2006). Comparative Dendroclimatological Studies of the Impact of Temperature and Rainfall on *Pinus nigra* Arnold and *Pinus sylvestris* in Northwestern Poland. *Baltic Forestry*, 12(1), 1
- Cedro, A., & Lamentowicz, M. (2011). Contrasting responses to environmental changes by pine (*Pinus sylvestris* L.) growing on peat and mineral soil : An example from a Polish Baltic bog. *Dendrochronologia*, 29(4), 211–217. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.12.004>
- Čejková, A., & Kolář, T. (2009). EXTREME RADIAL GROWTH REACTION OF NORWAY SPRUCE ALONG. *Geochronometria*, 33(1), 41–47. <https://doi.org/10.2478/v10003-009-0012-6>
- Čejková, A., & Poláková, S. (2010). GROWTH RESPONSES OF SESSILE OAK TO CLIMATE AND HYDROLOGICAL REGIME IN THE ZBYTKA NATURE RESERVE . *Geochronometria*, 39(4), 285–294. <https://doi.org/10.2478/s13386-012-0017-1>
- Čermák, P., Rybníček, M., Žid, T., Kolář, T., Bočková, H., & Přemyslovská, E. (2010). The effects of climatic factors on radial growth of Norway spruce *Picea abies* in the Silesian Beskids. *Beskydy*, 3(1), 1–10.
- Cheddadi, R., Vendramin, G. G., Litt, T., Kageyama, M., Lorentz, S., Laurent, J., ... Lunt, D. (2006). Imprints of glacial refugia in the modern genetic diversity of *Pinus sylvestris*. *Global Ecology and Biogeography*, 15(3), 271–282. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822x.2006.00226.x>
- Chytrý, M., Kučera, T., Kočí, M., Grulich, V., & Lustyk, P. (2010). Katalog biotopů České republiky. Praha: Agentura ochrany přírody a krajiny ČR.
- Cook, E. R., & Kairiukstis, L. A. (1990). *Methods of dendrochronology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Cook, E.R., Peters, K. (1997). The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41:45-53.
- Čufar, K., & Martin, Z. (2009). WOOD ANATOMY INSTRUCTIONS FOR LABORATORY WORK. Ljubljana: University of Ljubljana.

- Culek, M., Grulich, V., Laštůvka, Z., & Divíšek, J. (2013). Biogeografické regiony České republiky. Brno: Masarykova univerzita.
- Doležal, J., Lehečková, E., Sohar, K., & Altman, J. (2016). Oak decline induced by mistletoe, competition and climate change: A case study from central Europe. *Preslia*, 88(3), 323–346.
- Drápela, Karel a Jan Zach (1995). *Dendrometrie (Dendrochronologie)*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, ISBN 80-7157-178-4.
- Durrant, Houston T, de Rigo D., Caudulo G. (2016). *Pinus sylvestris* in Europe: an outline on distribution, habitat, importance and threats. In: *Online European Atlas of Forest Tree Species*. FISE Comm. Publications Office of the European Union.
- Esper, J., Frank, D. C., Wilson, R. J. S., & Briffa, K. R. (2005). Effect of scaling and regression on reconstructed temperature amplitude for the past millennium. *Geophysical Research Letter*, 32, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021236>
- Fajron, Aljos. a Denis. Filer (2010). *An atlas of the world's conifers: an analysis of their distribution, biogeography, diversity, and conservation status* [online]. [cit. 2017-07-03]. ISBN 978-900-4211-803.
- Feliksik, E., Wilczyński (2009). THE EFFECT OF CLIMATE ON TREE-RING CHRONOLOGIES OF NATIVE AND NONNATIVE TREE SPECIES GROWING UNDER HOMOGENOUS SITE CONDITIONS. *Geochronometria*, 33, 49–57. <https://doi.org/10.2478/v10003-009-0006-4>
- Friedrichs, D. A., Trouet, V., Büntgen, U., Frank, D. C., Esper, J., Neuwirth, B., & Löffler, J. (2009). Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees*, (23), 729–739. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0315-2>
- Fritts, Harold C (1976). *Tree rings and climate*. New York: Academic Press, ISBN 978-0-12-268450-0.
- Hendrych, Radovan (1984). *Fytogeografie*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, Učebnice pro vysoké školy.
- Hoffmann, K., Büntgen, U., Kyncl, T., Brázdil, R., & Esper, J. (2009). On the potential of fir ring width data for summer drought reconstruction in southern Moravia , Czech Republic. *Trace* 7, 57–63.
- Janda, Martin (2008). LETOKRUHOVÁ CHRONOLOGIE SMRKU PRO VÝCHODNÍ KRKONOŠE. Praha, Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Mgr. Václav Treml, PhD.

- Kolář, T., Giagli, K., Trnka, M., Bednářová, E., & Rybníček, M. (2016). Response of the leaf phenology and tree-ring width of *Silva Fennica*, 50(2), 1–18.
- Koprowski, M., Przybylak, R., Zielski, A., & Prospieszyńska, A. (2012). Tree rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a source of information about past climate in northern Poland. *International Journal of Biometeorology*, 56(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0390-5>
- Kroupová, M. (2002). Dendroecological study of spruce growth in regions under long-term air pollution load. *Journal of Forest Science*, 12(1), 536–548.
- Kyncl, Josef (2017). *Letokruhy jako kalendář i záznamník: zajímavosti z dendrochronologie*. Praha: Grada Publishing, ISBN 978-802-7101-986.
- Lehečková, Eliška (2013). Citlivost letokruhových řad borovice lesní (*Pinus sylvestris*) ke klimatickým parametrům. Praha, Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Mgr. Václav Treml, PhD.
- Lexikon dřev (2002) Stavba dřeva, Brno: Ústav nauky o dřevě, [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: [http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba\\_dreva/vyuka/index.htm](http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/vyuka/index.htm)
- Ložek, Vojen (2007). *Zrcadlo minulosti: česká a slovenská krajina v kvartéru*. Praha: Dokořán, ISBN 978-807-3630-959.
- Ložek, Vojen (2011). *Po stopách pravěkých dějů: o silách, které vytvářely naši krajinu*. Praha: Dokořán, ISBN 978-807-3633-011.
- Máková, M. (2008). Dendroclimatological comparison of native *Pinus sylvestris* and invasive *Pinus strobus* in different habitats in the Czech Republic. *Preslia*, 80, 277–289.
- Máková, M., Tichý T. (2007): Dendroclimatological comparison of invasive *Pinus strobus* and native *Pinus sylvestris* growing in the Czech Republic on ecological and geographical gradients. In: Härtel H., Cílek V., Herben T., Jackson A., Williams R. (eds.): *Sandstone landscapes*. Academia, Praha, s. 225–229.
- Melvin, Thomas M., Briffa Keith R. (2008): A “signal-free” approach to dendroclimatic standardisation. *Dendrochronologia* 26, 71–86
- Mitchell, T. D., & Jones, P. D. (2005). AN IMPROVED METHOD OF CONSTRUCTING A DATABASE OF MONTHLY CLIMATE OBSERVATIONS AND ASSOCIATED HIGH-RESOLUTION GRIDS. *International Journal of Climatology*, 25(1), 693–712. <https://doi.org/10.1002/joc.1181>
- Monterrubio, Glòria Coll (2014). Analysis of the growth of *Pinus sylvestris* and *Quercus petraea* from their tree rings and climatic series in northeastern Germany between

1920- 2009; basis for understanding their growth in the next years under climate change scenario. Barcelona, Bachelor. University of Barcelona Faculty of Geography and History.

- Neuwirth, B., Hans, F., & Winiger, M. (2007). Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia*, 24(1125), 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2006.05.004>
- Novák, J., & Svobodová-Svitavská, H. (2012). Unusual vegetation stability in a lowland pine forest area ( Doksy region , Czech Republic ). *The Holocene*, 22(8), 947–955. <https://doi.org/10.1177/0959683611434219>
- Oberhuber, W., Stumb, M., Kofler, W., Dendroclimatological, A., & Valley, S. R. (1998). Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands ( *Pinus sylvestris* L .) exposed to soil dryness. *Trees*, 13(1), 19–27. <https://doi.org/10.1007/PL00009734>
- Oberhuber, W., & Ko, W. (2002). Dendroclimatological spring rainfall reconstruction for an inner Alpine dry valley. *Theoretical and Applied Climatology*, 71(1), 97–107.
- Opala, M. (2012). TREE-RING BASED TEMPERATURE RECONSTRUCTION FOR THE UPPER SILESIA , SOUTHERN POLAND , SINCE A . D . 1572. International Scientific Conference Bioclimate 2012 - “Bioclimatology of Ecosystems.”
- Pallardy, S., G. (2008). *Physiology of woody plants* (third edit). Burlington, San Diego, London: Academic Press.
- Pérez, P. J., Kahle, H. P., & Spiecker, H. (2005). Growth trends and relationships with environmental factors for scots pine [ *Pinus sylvestris* ( L .)] in Brandenburg. *Forest Systems*, 14(1), 64–78. <https://doi.org/10.5424/srf/2005141-00874>
- Pokorný, Petr (2011). *Neklidné časy: kapitoly ze společných dějin přírody a lidí* [online]. Praha: Dokořán, ISBN 978-807-3633-929.
- Polacek, D., Kofler, W., & Oberhuber, W. (2006). Radial growth of *Pinus sylvestris* growing on alluvial terraces is sensitive to water-level fluctuations. *New Phytologist*, 169(2), 299–308. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01589.x>
- Ponocná, T., Spyt, B., Kaczka, R. J., Büntgen, U., & Treml, V. (2016). Growth trends and climate responses of Norway spruce along elevational gradients in East-Central Europe. *Trees*, 30(1), 1633–1646. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1396-3>
- Pospieszyńska, A., Koprowski, M., Zielski, A., & Przybylak, R. (2009). Climate reaction of old stands *Pinus sylvestris* L . in Go łą bki Forest Inspectorate ( Poland ). *Trace* 2009, 16–19.

- Quitt E. (1971): Klimatické oblasti Československa. Geografický ústav Československé akademie věd, Brno, 75 s.
- Richardson David M. (1998). Ecology and biogeography of Pinus [online]. Cambridge, England: Cambridge University Press, ISBN 978-052-1789-103.
- Rybníček, M., Čermák, P., Žid, T., & Kolář, T. (2010). RADIAL GROWTH AND HEALTH CONDITION OF NORWAY SPRUCE ( PICEA ABIES ( L .) KARST .) STANDS IN RELATION TO CLIMATE ( SILESIA BESKIDS , CZECH REPUBLIC ). Geochronometria, 36, 9–16. <https://doi.org/10.2478/v10003-010-0017-1>
- Rybníček, M., Čermák, P., Kolář, T., Přemyslovská, E., & Žid, T. (2009). Influence of temperatures and precipitation on radial increment of Orlické hory Mts . spruce stands at altitudes over 800 m a . s . l . Journal of Forest Science, 55(6), 257–263.
- Rybníček, M., Čermák, P., Kolář, T., & Žid, T. (2012 a). GROWTH RESPONSES OF NORWAY SPRUCE ( PICEA ABIES ( L .) KARST .) TO THE CLIMATE IN THE SOUTH-EASTERN PART OF THE ČESKOMORAVSKÁ UPLAND ( CZECH REPUBLIC ). Geochronometria, 39(2), 149–157. <https://doi.org/10.2478/s13386-012-0003-7>
- Rybníček, M., Kolář, T., Čermák, P., & Žid, T. (2012 b). Dendrochronological Analysis and Habitual Stress Diagnostic Assessment of Norway Spruce ( Picea abies ... Wood Research, 57(2), 189–206.
- Rybníček, M., Čermák, P., Žid, T., Kolář, T., Trnka, M., & Büntgen, U. (2015). EXPLORING GROWTH VARIABILITY AND CROWN VITALITY OF SESSILE OAK ( QUERCUS PETRAEA ) IN THE CZECH REPUBLIC. Geochronometria, 42(1), 17–27. <https://doi.org/10.1515/geochr>
- Rybníček, M., Čermák, P., Prokop, O., & Žid, T. (2016). Oak ( Quercus spp .) response to climate differs more among sites than among species in central Czech Republic. Dendrobiology, 75(1), 55–65.
- Rydval, M., & Wilson, R. (2012). The Impact of Industrial SO 2 Pollution on North Bohemia Conifers. Water Air Soil Pollut, 223(1), 5727–5744. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1310-6>
- Samusevich, Alina (2014). KLIMATICKÝ SIGNÁL V LETOKRUHOVÝCH CHRONOLOGIÍCH BOROVICE KLEČE. Praha, Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Mgr. Václav Tremel, PhD.



- Sander, C., Eckstein, D., Kyncl, J., & Dobrý, J. (1995). The growth of spruce (*Picea abies* (L.) Karst) in the Krkonoš & Giant Mountains as indicated by ring width and wood density. *Annals of Forest Science*, 52(1), 401–410.
- Schweingruber F. H. (1996): *Tree Rings and Environment. Dendroecology*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf. Paul Haupt Publishers, Berne, Stuttgart, Vienna, 609 s.
- Sensuła, B., Opała, M., Wilczy, S., & Pawełczyk, S. (2015). Dendrochronologia Long- and short-term incremental response of *Pinus sylvestris* L. from industrial area nearby steelworks in Silesian Upland, Poland. *Dendrobiology*, 36(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.08.001>
- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of Tree-Ring Research*. Tuscon: University of Arizona Press.
- Štefáček, Stanislav (2008). *Encyklopedie vodních toků Čech, Moravy a Slezska*. Praha: Baset, ISBN 978-80-7340-105-4.
- Stoch et al. (2004). *Microscopic Wood Anatomy* [online]. [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: <http://www.woodanatomy.ch/species.php?code=PISY>
- Svoboda, Pravdomil (1953). *Lesní dřeviny a jejich porosty. Část I*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství.
- Tolasz, Radim (2007). *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia* [CD-ROM]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, ISBN 978-80-86690-26-1.
- Treml, V., Ponocná, T., & Büntgen, U. (2012). Growth trends and temperature responses of treeline Norway spruce in the Czech-Polish Sudetes Mountains. *Climate Research*, 55(1), 91–103. <https://doi.org/10.3354/cr01122>
- Treml, V., Ponocná, T., King, G. M., & Büntgen, U. (2015). A new tree-ring-based summer temperature reconstruction over the last three centuries for east-central Europe. *International Journal of Climatology*, 31(1), 3160–3171. <https://doi.org/10.1002/joc.4201>
- Tumajer, J., & Treml, V. (2016). Response of floodplain pedunculate oak (*Quercus robur* L.) tree-ring width and vessel anatomy to climatic trends and extreme hydroclimatic events. *Forest Ecology and Management*, 379(1), 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.013>
- Úradníček, Luboš (2009). *Dřeviny České republiky. 2., přeprac. vyd.* Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, ISBN 978-80-87154-62-5.

Vejpustková, Monika (2008). TRENDY TLOUŠŤKOVÝCH A VÝŠKOVÝCH PŘÍRŮSTŮ SMRKU ZTEPILÉHO (*Picea abies* (L.) KARST.) V OBLASTECH S HISTORICKY ODLIŠNÝMI VSTUPY DUSÍKU. Praha, Disertační práce. ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE, Fakulta lesnická a dřevařská. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Kouba, CSc.

Wilczyński, V. S., & Skrzyszewski, J. (2002). The climatic signal in tree-rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from foot-hills of the Sudetic Mountains ( southern Poland ) Das klimatische Signal in den Jahrringen von Kiefern (*Pinus sylvestris* L.). Forstw. Cbl., 121(1), 15–24.

Wilson, R. J. S., Luckman, B. H., & Esper, J. (2005). A 500 year dendroclimatic reconstruction of spring-summer precipitation from the lower Bavarian Forest region, Germany. *International Journal of Climatology*, 25(5), 611–630. <https://doi.org/10.1002/joc.1150>

### **Programy:**

Biondi, F., & Waikul, K. (2004). DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers and Geosciences*, 30(3), 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.11.004>

Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>

Cook, Edvard Roger (1985). A time series analysis approach to tree ring standardization, Tucson, Dissertation. University of Arizona.

Knibbe, B. (2004): PAST 4. Brunn, SCIEM.